



Tesis SF 142502

# **Enkapsulasi Fiber Bragg Grating (FBG) dengan Keramik Geopolimer untuk Perancangan Sensor Temperatur Tinggi**

Haerul Ahmadi  
NRP 1113201046

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN FISIKA INSTRUMENTASI  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



Thesis SF 142502

# **Encapsulation Fiber Bragg Grating (FBG) with geopolymer ceramics as High-Temperature Sensor**

Haerul Ahmadi  
NRP 1113201046

SUPERVISOR  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

MAGISTER PROGRAM  
STUDY ON INSTRUMENTATION  
PHYSICS DEPARTMENT  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015


Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

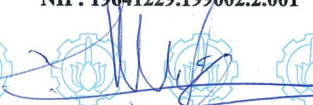
oleh :  
Haerul Ahmadi  
Nrp. 1113201046

Tanggal Ujian : 25 Juni 2015  
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh :

  
1. Dr. Melania Suweni M, M.T  
NIP: 19641229.199002.2.001

(Pembimbing)

  
2. Prof. M. Zaki M. Sc

(Penguji)

  
3. Endarko, M.Si., Ph.D  
NIP: 19741117.199903.1.001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T  
NIP. 19640405 199002 1 001



# Enkapsulasi Fiber Bragg Grating (FBG) dengan Keramik Geopolimer untuk Perancangan Sensor Temperatur Tinggi

Nama mahasiswa : Haerul Ahmadi  
NRP : 1113201046  
Pembimbing : Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang perancangan sistem sensor temperatur tinggi berbasis fiber bragg grating (FBG) dengan metode enkapsulasi. Metode Enkapsulasi FBG menggunakan *ceramic tube* berbahan dasar *mullite ceramic* dan *Geopolymer Ceramic*. Penelitian ini menggunakan efek pergeseran panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B$ ) akibat pengaruh perubahan temperatur pada FBG. Akuisisi data pergeseran panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B$ ) menggunakan *Optical spektrum analyzer (OSA)* dengan sumber cahaya dari *Internal Wavelength Calibrator*. Hasil pengujian karakteristik sensor diperoleh nilai sensitifitas *Bare* FBG sebesar 10 pm/°C sedangkan pada sistem sensor Keramik *Mullite* dan sistem sensor keramik geopolimer memiliki sensitifitas masing-masing sebesar 11 pm/°C dan 6 pm/°C. Resolusi untuk *Bare* FBG diperoleh 0.1°C sedangkan pada sistem sensor Keramik *Mullite* dan sistem sensor keramik geopolimer diperoleh resolusi masing-masing sebesar 0.08°C dan 0.15°C. Metode enkapsulasi telah berhasil meningkatkan *Range* pengukuran FBG dari 300°C menjadi 386°C dengan keakurasian, presisi dan kestabilan yang tinggi.

Kata Kunci : Fiber bragg grating (FBG), Enkapsulasi, Keramik Geopolimer, Panjang Gelombang Bragg ( $\lambda_B$ ), *Internal Wavelength Calibrator* dan Optical Spectrum Analyzer (OSA)

# Encapsulation Fiber Bragg Grating (FBG) with geopolymer ceramics as High-Temperature Sensor

Name : Haerul Ahmadi  
NRP : 1113201046  
Supervisor : Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

## Abstract

It has done a research about system design of high-temperature sensor that based on fiber Bragg grating (FBG) with encapsulation method. The FBG encapsulation method uses a ceramic tube which contains *mullite ceramic* and *Geopolymer Ceramic*. This study uses Bragg wavelength shift effect ( $\lambda_B$ ) as a consequence of the effect of temperature changes on the FBG. Data acquisition of Bragg wavelength shift ( $\lambda_B$ ) uses *Optical spectrum of analyzer* (OSA) with a light source from *the Internal Wavelength Calibrator*. The test results of sensor characteristics are obtained sensitivity value of *Bare* FBG at 10 pm / $^{\circ}$ C, while the *Mullite* Ceramics sensor systems and geopolymer ceramic sensor systems have a sensitivity respectively at 11 pm / $^{\circ}$ C and 6 pm / $^{\circ}$ C. Resolution for *Bare* FBG is obtained 0.1  $^{\circ}$ C, while the *Mullite* Ceramics sensor systems and geopolymer ceramic sensor systems are obtained resolution respectively at 0.08  $^{\circ}$ C and 0.15  $^{\circ}$ C. Encapsulation method has been successful to increase FBG measurement range from 300  $^{\circ}$ C to 386  $^{\circ}$ C with the accuracy, precision and high stability.

**Keywords :** Fiber Bragg Grating (FBG), Encapsulation, Geopolymer Ceramics, Bragg Wavelength ( $\lambda_B$ ), Internal Wavelength Calibrator and Optical Spectrum Analyzer (OSA)

## **KATA PENGANTAR**

Syukur Alhamdulillah senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Hidayah-Nya. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Rasulullah, Nabi Muhammad SAW. Hanya dengan bimbingan dan karunia-Nya, penulis mampu menyelesaikan tesis yang berjudul:

### **Enkapsulasi Fiber Bragg Grating (FBG) dengan Keramik Geopolimer untuk Perancangan Sensor Temperatur Tinggi**

Penyusunan tesis ini merupakan salah satu syarat memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) di Jurusan Fisika FMIPA ITS. Penulis menyadari bahwa terselesaikannya penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak, Ibu, Saudara, dan seluruh keluarga besar tercinta yang tidak pernah lelah memotivasi dan mendoakan sehingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan studi S2 ini.
2. Ibu Dr. Melania Suweni Muntini, MT selaku dosen pembimbing atas arahan, motivasi, kesabaran dan ketekunan selama membimbing penulis.
3. Bapak Prof. Mahmud Zaki, M.Sc. dan Bapak Endarko, M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan dan arahan yang berharga bagi penulis.
4. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA ITS
5. Seluruh dosen dan civitas akademika Jurusan Fisika ITS atas ilmu yang telah diberikan selama ini, semoga bisa menjadi ilmu yang bermanfaat.
6. Dirjen Dikti Kementerian RISTEKDIKTI yang telah memberikan beasiswa kepada penulis dalam menjalani program Pra-S2 dan S2 di Jurusan Fisika ITS.
7. Bapak Subaer Junaedi, M.Phil., Ph.D. yang telah memberikan dukungan dan waktu diskusi banyak bagi penulis dalam penyelesaian tesis ini.

8. Teman-teman seperjuangan di “RUDAL”, “RADAR” dan “R6”, kak Ikhsan Mahardika, Andi Rosman N., Syamsul Irfan, Muhammad Ramadhan, Yasser Arafat, Muh. Muflih, Andi Asrafiani Arafah, Andi Sri Rahayu, Andi Indra Wulansari R.H., Winda Dwi Putri, Kak Ummu dan Nur Ichzan atas persaudaraan dan kekeluargaan yang tercipta selama diperantauan.
9. Mas Nurhadi yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan selama menjalani perkuliahan di Jurusan Fisika serta menjadi teman diskusi yang sangat sabar.
10. Kak Andi Irhamsyah, M.Si. yang telah memberikan dukungan dan saran sehingga bisa menjalani kuliah dengan lancar selama di ITS.
11. Teman-teman Pra-S2 Angkatan 2012 dan S2 Angkatan 2013 yang tidak dapat penulis sebut satu persatu, atas segala bantuan dan dukungan selama kuliah.
12. Teman-teman seperjuangan di Lab Instrumentasi Oktavianus ama Ki’I, Mas Humaidillah, Pak Richard, Pak Sagita, Gusti, Emy, Aris dan Ayu jati atas kebersamaan dan menjadi teman diskusi yang menyenangkan.
13. Nur Fitriyani Hardi atas support, semangat dan doanya.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini masih banyak kekurangan, oleh karenanya kritik dan saran sangat penulis harapkan guna menyempurnakan penulisan ini. Akhir kata penulis mengucapkan banyak terima kasih dan semoga tesis ini dapat berguna bagi kita semua

Surabaya, Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1. Karakteristik Temperatur .....	5
2.2. Defenisi dan aplikasi Geopolimer.....	6
2.3. Fiber Bragg Grating (FBG).....	9
2.3.1. Defenisi Fiber Bragg Grating (FBG) .....	9
2.3.2. Pengaruh Strain dan Temperatur terhadap FBG .....	12
2.4. Optical Spectrum Analyzer .....	16
2.5. Karakteristik Sensor .....	20
BAB 3 METODA PENELITIAN .....	27
3.1. Jenis dan Tempat Penelitian.....	27
3.2. Alat dan Bahan .....	28
3.3. Parameter Observasi.....	28
3.4. Prosedur Penelitian.....	28
3.4.1. Perancangan Probe (Head Sensor) .....	28
3.4.2. Perancangan Sistem Pengukuran .....	30



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	37
4.1. Hasil Pengujian Karakteristik OSA dan <i>Source</i> OSA .....	37
4.2. Proses Pengukuran dan Karakteristik Fiber Bragg Grating (FBG) .....	39
4.2.1. Pengujian Linearitas dari FBG .....	43
4.2.2. Pengujian Repeatability dari FBG.....	45
4.2.3. Pengujian Hysteresis dari FBG .....	47
4.3. Hasil Perancangan Sistem Sensor Keramik .....	48
4.4. Karakteristik Sistem Sensor Keramik <i>Mullite</i> .....	55
4.4.1. Hasil Uji Linearitas Sistem Sensor Keramik <i>Mullite</i> .....	55
4.4.1. Hasil Uji Hysteresis Sistem Sensor Keramik <i>Mullite</i> .....	56
4.4.1. Hasil Uji Repeatability Sistem Sensor Keramik <i>Mullite</i> .....	57
4.5. Karakteristik Sistem Sensor Keramik Geopolimer .....	59
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	67
5.1. Kesimpulan.....	67
5.2. Saran .....	68
DAFTAR PUSTAKA.....	69
LAMPIRAN .....	73
BIOGRAFI PENULIS .....	85

## DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1. Hasil Iterasi Data Pergesaran Panjang Gelombang Bragg .....	40
Tabel 4. 2. Hasil Perhitungan Standar Deviasi .....	46
Tabel 4. 3. Perbandingan nilai Range, sensitivitas dan Resolusi Sistem sensor .....	63
Tabel 4. 4. Perbandingan Jangkauan Pengukuran Sistem Sensor .....	64

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jaringan Molecular Geopolymeric .....	7
Gambar 2. 2 Struktur Fiber Bragg Grating Beserta Spectrum Transmisi dan Refleksinya .....	10
Gambar 2. 3 Ilustrasi dari Fiber Bragg Grating .....	11
Gambar 2. 4 (a) Proses Refleksi Dan Refraksi Cahaya Dalam FBG (b) Wave Vector Diagram .....	12
Gambar 2. 5 Kelengkungan Fiber Optic Akibat Makrobending dan Mikrobending .....	14
Gambar 2. 6 Fiber Bragg Grating Akibat Pengaruh Suhu dan Strain .....	15
Gambar 2. 7 Optical Spectrum Analyzer (OSA type AQ6370C Yokogawa).....	17
Gambar 2. 8. Konfigurasi Dasar dari Optical Spectrum Analyzer.....	17
Gambar 2. 9 Optical Spectrum Analyzer (OSA) Berbasis Double-Pass Monocromator..	18
Gambar 2. 10 Diagram Blok Dasar OSA.....	19
Gambar 2. 11 Penentuan Error Kalibrasi .....	21
Gambar 2. 12 Ilustrasi Akurasi dan Presisi.....	23
Gambar 2. 13 Kurva Hysteresis .....	25
Gambar 3. 1 Fiber Bragg Grating(FBG) dengan C.W. 1550 nm.....	27
Gambar 3. 2 Rancangan Probe (Head Sensor) (a) Probe Keramik mullite. (b) Probe Keramik Geopolimer .....	29
Gambar 3. 3 Gambar desain Probe sensor (a) desain letak FBG dalam probe (b) penampang atas Probe sensor .....	30
Gambar 3. 4. Rancangan Pengujian Karakteristik FBG .....	30
Gambar 3. 5 Desain Furnace untuk pengukuran.....	31
Gambar 3. 6. Skema Set-up Sistem Pengukuran.....	32
Gambar 4. 1. Interface FBG pada Optical Spectrum Analyzer (OSA agilent 86142 B) ....	38
Gambar 4. 2. (a) Blok diagram Internal Wavelength Calibrator (b) Lebar Pita sumber LED .....	38
Gambar 4. 3. Spektrum Transmisi FBG C.W. 1550 $\pm$ 0.5 nm .....	39
Gambar 4. 4 Pengaruh Temperatur Terhadap Pergeseran .....	41
Gambar 4. 5. Perbandingan Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Dan Intensitas Transmisi Dari FBG Akibat Pengaruh Temperatur.....	42

Gambar 4. 6. Persamaan Garis Linear pada Pergeseran panjang gelombang Bragg Pada Bare FBG .....	44
Gambar 4. 7. Hasil Uji Repeatibility Bare FBG.....	45
Gambar 4. 8. Hasil Uji Hysteresis Bare FBG.....	47
Gambar 4. 9. Hasil Pengujian SEM-EDS Keramik Geopolimer.....	49
Gambar 4. 10.(a) Model cetakan pasta geopolimer, (b) Ceramic Tube geopolimer .....	50
Gambar 4. 11.(a) Mettler Thermomechanical Analyser (TMASDTA840)-1 di Lab. Energi ITS, (b) Proses Pengukuran Koefisien Ekspansi Thermal Keramik Geopolimer .....	51
Gambar 4. 12.Hasil Pengujian TMA Keramik Geopolimer KM-01 .....	51
Gambar 4. 13.Desain Chamber Furnace Sistem Pengukuran .....	53
Gambar 4. 14.Set-up Pengukuran Sistem Sensor Sensor FBG .....	54
Gambar 4. 15.Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Pada Sistem Sensor Berbahan Keramik Mullite .....	55
Gambar 4. 16.Hasil Uji Hysteresis Sistem Sensor Keramik Mullite .....	56
Gambar 4. 17.Hasil Uji Repeatibility Sistem Sensor Keramik Mullite .....	57
Gambar 4. 18.Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Pada Probe Sensor Fbg Dari Keramik Geopolimer Berbahan Metakaolin.....	59
Gambar 4. 19.Grafik Kurva Hysteresis Probe sensor FBG Keramik Geopolimer.....	60
Gambar 4. 20.Hasil Uji Repeatibility Probe Sensor FBG .....	61

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran A</b> Data Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Dan Intensitas Transmisi FBG .....	73
<b>Lampiran B</b> Data Pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg <i>Bare</i> FBG .....	74
<b>Lampiran C</b> Data Hasil Perhitungan Uji Hysteresis bare FBG .....	75
<b>Lampiran D</b> Hasil Uji Repeatability Dan Perhitungan Standar Deviasi Sistem Sensor Keramik Mullite .....	76
<b>Lampiran E</b> Hasil pengujian dan perhitungan nilai Hysteresis pada sistem sensor Kermaik Mullite .....	77
<b>Lampiran F</b> Hasil Uji repeatability dan perhitungan standar deviasi sistem sensor keramik geopolimer .....	78
<b>Lampiran G</b> Hasil Akuisisi Data Spektrum Transmisi OSA .....	79
<b>Lampiran H</b> Datasheet Optical Spectrum Analyzer (OSA) Agillent 86142 B .....	80
<b>Lampiran I</b> Hasil Pengujian XRD Keramik Geopolimer.....	81
<b>Lampiran J</b> Hasil Pengujian TMA Keramik Geopolimer.....	82
<b>Lampiran K</b> Datasheet Thermocouple Type-K .....	83
<b>Lampiran L</b> Datasheet Fiber Bragg Grating(FBG) .....	84

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1.Latar Belakang**

Teknologi fiber optik dalam pemanfaatannya sebagai pandu gelombang telah berkembang dengan cepat terutama dalam bidang telekomunikasi. Selain dari aplikasi tersebut, perkembangan teknologi fiber optik juga telah dikembangkan dalam aplikasi sebagai sensor. Telah banyak riset yang berkaitan dengan aplikasi tersebut. Salah satu aplikasi fiber optik sebagai sensor adalah sebagai sensor temperatur. Namun, selama ini aplikasi fiber optik sebagai sensor temperatur adalah hanya terbatas pada pengukuran suhu rendah. Untuk itu, diperlukan aplikasi yang lebih tepat untuk pemanfaatan fiber optik sebagai sensor pada temperatur tinggi. Sensor dengan spesifikasi temperatur tinggi, diperlukan untuk beberapa keperluan seperti monitoring kesehatan dan proses material, transformasi listrik dan aplikasi eksplorasi pertambangan (Wang, jiang, and Yu, n.d.).

Pemanfaatan sensor temperatur tinggi selama ini mempunyai banyak kekurangan, diantaranya adalah : reliabilitas rendah, fluktuasi temperatur dan potensi kebakaran yang tinggi, sedangkan untuk aplikasi pada daerah pertambangan misalnya, kebutuhan akan sebuah sistem instrumentasi dengan kemampuan temperatur tinggi, tekanan tinggi, tahan terhadap bahan kimia serta tahan terhadap pengaruh elektromagnetik (EMI). Dalam kondisi ekstrim, sangat sulit untuk memanfaatkan sensor konvensional dan alat ukur termokopel untuk temperatur tinggi dan pyrometer akustik(Parne Saidi Reddy et al. 2010).

Sejauh ini telah banyak sensor yang menggunakan POF (*Polymer Optical Fiber*) sebagai sensor temperatur. Hal ini karena POF tidak dapat diaplikasikan untuk temperatur lebih dari 100<sup>0</sup>C(Manuel Silva-López et al. 2005), sehingga tidaklah memungkinkan untuk diaplikasikan untuk suhu yang lebih ekstrim lagi. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan FBG untuk aplikasi temperatur tinggi, yang merupakan tipe fiber optik yang paling tepat untuk tujuan tersebut.

*Fiber Bragg Grating* (FBG) merupakan sensor optik yang bekerja berdasarkan efek resonan dari suatu kisi-kisi indeks bias, dimana panjang gelombang resonannya ditentukan oleh jarak kisi-kisinya. Pemanfaatan FBG yaitu dapat diaplikasikan sebagai sensor temperatur dan sensor strain. Dari prinsip tersebut maka bila jarak kisi-kisi berubah karena adanya perubahan suhu maka puncak panjang gelombang resonannya juga akan berubah. Perubahan puncak resonan diukur untuk mengetahui suhu yang mengenainya. *Fiber Bragg Grating* (FBG) sensor memiliki banyak keunggulan yaitu bebas dari pengaruh interferensi elektromagnetik, stabilitas tinggi, lebih mudah dalam pengaplikasiannya, cocok untuk diaplikasikan untuk daerah pertambangan (Zhan et al. 2008a).

Telah banyak penelitian untuk mendapatkan metode yang tepat dalam pengukuran temperatur tinggi dengan menggunakan FBG. Pada penelitian sebelumnya, yang meneliti tentang karakteristik dari FBG untuk pengukuran temperatur tinggi dengan spesial dopan seperti Sn dan Na<sub>2</sub>O. Dimana dalam penelitian ini, memperlihatkan adanya getaran yang tidak biasa pada dalam proses refleksi. Hal ini menandakan ketidakcocokan metode ini untuk pengukuran temperatur tinggi(Brambilla, et al 2010). Pada penelitian yang lain yang dilaksanakan oleh Saidi Reddy et al, dimana dalam penelitiannya menggunakan metode chemical composition grating (CCG). Metode ini mampu untuk mengukur sampai temperatur 900° C, namun sensitifitasnya kecil(Parne Saidi Reddy et al. 2010).

Dengan berlandaskan pada penjelasan di atas maka perlu pengembangan pemanfaatan FBG untuk aplikasi sensor temperatur. Oleh karena itu peneliti ingin mengembangkan sebuah metode pengukuran, sebagai sebuah metode untuk memecahkan permasalahan tentang kerusakan FBG apabila pemanasan pada suhu yang ekstrim. Hal yang sama telah dilakukan oleh reddy et.al tentang pengontrolan temperatur dengan FBG dengan prinsip bimetal.(Reddy et al. 2012). Penelitian yang serupa juga memanfaatkan prinsip CTE dalam pengukuran temperatur tinggi yang dikerjakan oleh yage zhan(Zhan et al. 2008b) namun hasil yang diperoleh ternyata temperatur yang diperoleh di bawah 100°C, tidak linear sehingga metode yang digunakan kurang cocok untuk pengukuran temperatur tinggi namun tetap memiliki kehandalan pada temperatur rendah. Oleh karena itu

pada penelitian ini dirancang sebuah probe (*head sensor*) dengan melindungi FBG dengan menanam FBG pada keramik geopolimer yang memiliki konduktivitas thermal rendah Sehingga FBG tidak akan bersentuhan dengan oven pemanas melainkan head sensor yang telah dilindungi dengan keramik geopolimer dan stainless tube. Penelitian dengan menggunakan *head sensor* dari bahan keramik juga telah dilakukan oleh Hirayama(Noritomo Hirayama and Yasukazu Sano 2000).

Pada penelitian ini, alat yang juga dapat digunakan untuk mengamati spektrum transmisi dari *source* yang melewati serat optik yaitu *Optical Spectrum Analyzer* (OSA). OSA dapat digunakan untuk mengukur pergeseran panjang gelombang Bragg sebagai fungsi temperatur. Pemanfaatan OSA dianggap mampu meminimalisir ketidak presisian pengukuran yang selama ini menggunakan photodetector dengan sumber cahaya berupa LED. Semoga riset ini mampu memberikan sumbangsih besar dalam pengembangan sensor temperatur untuk aplikasi temperatur tinggi.

## **1.2.Rumusan Masalah**

Rumusan Masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana Merancang dan membuat sistem pengukuran temperatur tinggi menggunakan sensor *Fiber Bragg Grating* (FBG).
2. Bagaimana menganalisa sistem pengukuran untuk mendapatkan karakterisasi sistem sensor yang dibuat.

## **1.3.Tujuan Penelitian**

Tujuan Penelitian ini yaitu :

1. Merancang dan membuat sistem pengukuran temperatur tinggi menggunakan sensor FBG.
2. Mengetahui karakteristik FBG serta prinsip kerja OSA dalam menganalisa panjang gelombang serat optik.
3. Melakukan analisa karakterisasi sistem sensor yang telah dirancang.



#### 1.4. Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

- 1) Fiber optik yang digunakan merupakan Fiber Optik Single Mode type FBG dengan panjang gelombang  $\lambda_B=1550$  nm dari bahan polymide
- 2) Head sensor yang dirancang dari bahan keramik geopolimer dari bahan dasar *Metakaolin*
- 3) Variasi pengukuran dilakukan pada temperatur maksimum 250 °C
- 4) Variabel yang akan diteliti hanya tentang pengaruh temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang.
- 5) Pengamatan pergeseran panjang gelombang Bragg dengan memanfaatkan spectrum transmisi dari FBG.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

- 1) Menambah nilai guna dari fiber optik sebagai sensor temperatur
- 2) Memberikan pemahaman tentang metode penggunaan Optical Spectrum Analyzer (OSA) berbasis pergeseran panjang gelombang.
- 3) Menjadi landasan dalam penggunaan Fiber optik type FBG sebagai sensor temperatur tinggi.
- 4) Menjadi landasan dalam pengembangan sensor Fiber Optik untuk temperatur tinggi sehingga dapat digunakan dalam dunia industri atau dalam bidang riset yang lain.

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Karakteristik Temperatur

Temperatur adalah ukuran panas-dinginnya dari suatu benda. Panas-dinginnya suatu benda berkaitan dengan energi termis yang terkandung dalam benda tersebut. Makin besar energi termisnya, makin besar temperaturnya. Energi panas berkaitan langsung dengan energi molekular (getaran, gesekan dan osilasi partikel dalam sebuah molekul) semakin tinggi energi panas, semakin besar energi molekul.

Temperatur berkaitan langsung dengan nilai kelembaban relatif yang mana kelembaban relatif didefinisikan sebagai perbandingan jumlah uap air yang dikandung udara terhadap jumlah uap air maksimum. Saturasi jumlah uap air maksimum tergantung pada Temperatur. Ketergantungan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Shiue et al. 2006) :

$$RH = \frac{P_w}{P_s} \quad (2.1)$$

$$P_s(T) = P_s(0) + k \left[ \frac{T - 0^\circ C}{100^\circ C} \right]^n \quad (2.2)$$

dengan :

$RH$	= kelembaban relatif,
$P_w$	= tekanan parsial uap air,
$P_s$	= tekanan uap air jenuh pada temperatur yang sama,
$k$	= 0,0987 Mpa,
$n$	= 3,36,
$P_s(0)$	= 0,00198 Mpa adalah tekanan uap air jenuh pada suhu $T = 0^\circ C$ .

Selain berpengaruh langsung kelembaban relatif, temperatur juga berpengaruh pada koefisien ekspansi termal (CTE) dan koefisien termo-optik (TOC) serat optik. CTE menandakan ekspansi fisik atau kontraksi dari volume material, sedangkan TOC menunjukkan perubahan indeks bias sebagai respon dari perubahan temperatur (Hatta et al. 2009).

Pengaruh temperatur pengukuran pada panjang gelombang skema *ratiometric* menggunakan fiber optik berefek pada hilangnya transmisi filter cahaya. Hal tersebut menunjukkan bahwa TOC membuat kontribusi yang lebih signifikan untuk ketergantungan temperatur dibandingkan dengan CTE (Hatta et al. 2009). Selanjutnya hubungan temperatur berkaitan dengan radius inti, adalah panjang fiber optik, dan indeks bias dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$R = R + \alpha * R * \Delta T \quad (2.3)$$

$$L_{(1,2)T} = L_{(1,2)0} + \alpha * L_{(1,2)0} * \Delta T \quad (2.4)$$

$$n_{(cor,clad)_y} = n_{(cor,clad)0} + \xi * n_{(cor,clad)0} * \Delta T \quad (2.5)$$

dengan:

R = radius inti,  
L = panjang fiber optik,  
n = indeks bias,  
 $\Delta T$  = perubahan temperatur,  
 $\alpha$  = koefisien ekspansi termal (CTE),  
 $\xi$  = koefisien termo-optik (TOC).

## 2.2. Defenisi dan Aplikasi Geopolimer

Sekitar tahun 1980-an, Davidovits mengembangkan polymer anorganik aluminasilikat yang bersifat amorf hingga semi-kristal, dan sekarang dikenal dengan nama *geopolymer* (polymer mineral yang dihasilkan melalui proses geokimia). Keutamaan aluminasilikat secara geologi adalah karena melimpahnya mineral Si-Al seperti kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Geopolymer melibatkan reaksi kimia antara berbagai oksida aluminasilikat ( $\text{Al}^{3+}$  dalam koordinasi lipat-IV)

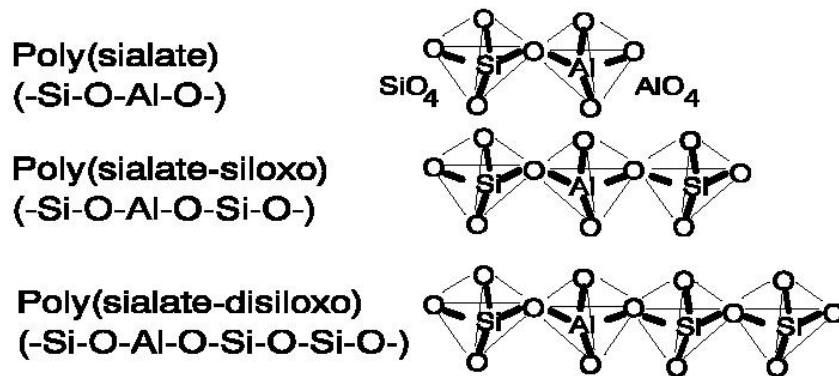
dengan silikat di bawah kondisi alkaline tinggi dan menghasilkan ikatan polymerik -Si-O-Al-O- (davidovits, n.d.)

Keluarga geopolymer yang berbasis aluminasilikat disebut *poly(sialates)* terdiri atas jaringan amorf  $\text{AlO}_4$  dan  $\text{SiO}_4$  tetrahedral dihubungkan secara bergantian dengan membagi atom oksigen. Sialate adalah singkatan dari silicon-oxo-aluminate (-Si-O-Al-O-). (davidovits 1994)

Kehadiran ion positif seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ , and  $\text{Ca}^{++}$ , di dalam jaringan geopolymer diperlukan untuk menyeimbangkan muatan negative dari  $\text{Al}^{3+}$  dalam koordinasi lipat-IV dengan oksigen. Model polymeric ini serupa dengan proses formasi zeolite dan precursor zeolit. Rumus empiris *poly(sialates)* ditunjukkan pada persamaan berikut (davidovits 1991):

$$\text{M}_n [(-\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.6)$$

$\text{M}_n$  menyatakan kation (elemen alkali),  $n$  adalah derajat polykondensasi,  $w \leq 3$  dan  $z$  adalah 1, 2 atau 3. Menurut Davidovits (1991) geopolymer terdiri atas sejumlah *poly(sialates)* dasar seperti ditunjukkan pada berikut



Gambar 2. 1 Jaringan Molecular Geopolymeric

Diawal perkembangannya, sebagian besar geopolymer disintesa melalui aktivasi-alkali kaolin dehidroksilasi (*dehydroxylated kaolinite*) atau metakaolin di bawah suhu 100 °C (Granizo, Blanco-Varela, and Palomo 2000). Akhir-akhir ini, berbagai mineral Al-Si, debu terbang, furnace slag, pozzolan dan campuran metakaolin/debu terbang atau kaolin/stilbite, telah digunakan untuk memproduksi

geopolymer. Material yang paling menarik adalah pemanfaatan material sisa untuk memproduksi semen geopolymer yang ekonomis dan ramah lingkungan atau material bangunan tahan api (Palomo et al. 1999).

Istilah aktivasi-alkali menunjukkan bahwa ion alkali atau alkali tanah digunakan sebagai aktivator untuk merangsang reaksi pozzolanic atau melepaskan sifat latent semen dari mineral aluminasilikat atau produk sisa (seperti debu terbang) yang umumnya mengandung silikat, aluminasilikat dan calcium. Aktivator adalah sebuah substansi yang merubah laju reaksi kimia tanpa mengalami perubahan kimia (Granizo, Blanco-Varela, and Palomo 2000)

Mineral lempung (*clay minerals*) merupakan kelompok mineral yang penting sebagai hasil dari pelapukan kimia batuan dan karena itu merupakan komponen utama dari butiran-halus batuan sedimen yang disebut *mudrocks* (termasuk *mudstone*, *claystone*, dan *shales*). Sesungguhnya, mineral lempung membentuk 16% mineral batuan sedimen, sekaligus sebagai komponen utama batuan. Pengetahuan tentang mineral lempung juga sangat penting dari sudut pandang rekayasa (engineering) oleh karena sejumlah mineral lempung mengembang ketika terkena air. Secara ekstensif, mineral lempung digunakan pada industri keramik dan karena itu termasuk mineral dengan nilai ekonomi yang penting.

Berdasarkan struktur dan komposisi kimia, mineral lempung dapat dibagi atas tiga (3) kelompok:

1. kandites dengan struktur yang mirip dengan struktur kaolinite
2. smectites dengan struktur yang mirip dengan struktur Pyrophyllite
3. illites dengan struktur yang mirip dengan struktur Muscovite

Setiap kelompok mineral tersebut terbentuk dibawah lingkungan dan kondisi kimia yang berbeda. Sebagai polimer, geopolimer dapat bereaksi, terpolikondensasi dan mencapai kestabilan dimensional pada suhu di bawah 100°C. Geopolimer yang dihasilkan bersifat keras dan tahan terhadap cuaca, serangan bahan kimia dan suhu tinggi. Agregat pasir dan mineral lainnya dapat dicampurkan ke matriks geopolimer untuk membentuk material yang menyerupai komposit-keramik, mortar dan beton. Semen geopolimer seperti (*K-Ca poly(sialate-siloxo)*), dicampur pada suhu rendah dan mengeras dengan cepat

selama proses polimerisasi dengan kekuatan tekan (*compressive strength*) akhir serupa bahkan lebih baik dari kekuatan tekan semen portland. Kekuatan tekan semen geopolimer dapat mencapai 20 MPa dalam beberapa jam setelah proses polimerisasi, dan mencapai nilai 70-100 MPa dalam waktu kurang dari satu bulan. (davidovits 1994)

Perpindahan panas dapat diperoleh dengan penggunaan lebih dari satu mekanisme. Sebagai contoh, konduksi dan konveksi paksa digunakan ketika sebuah fluida dipaksa mengalir melewati pori-pori zat padat yang bersifat konduktor termal.

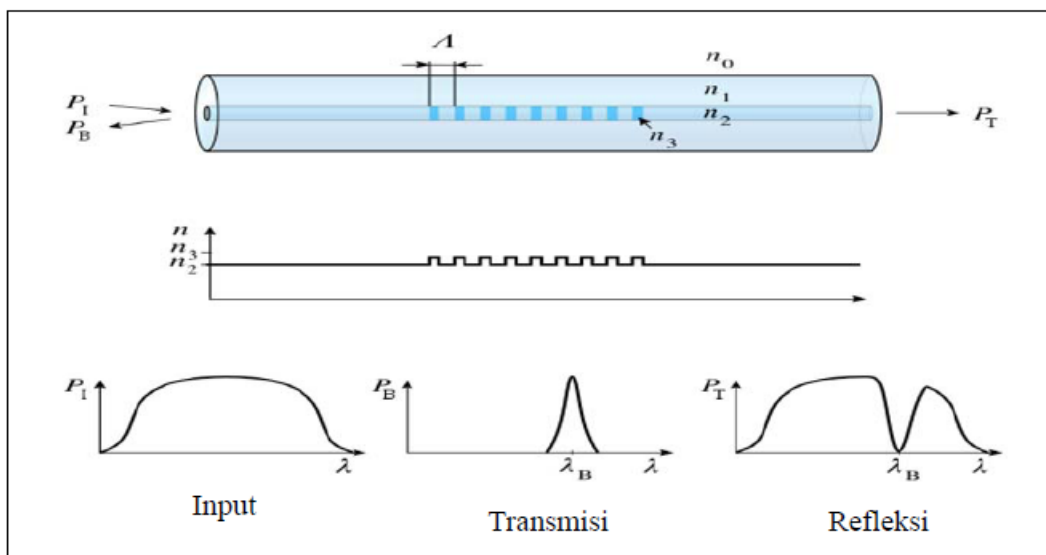
Konduksi termal melibatkan peran elektron, ion, dan/atau fonon. Elektron dan ion bergerak dari titik bertemperatur tinggi ke titik bertemperatur rendah dan karena itu memindahkan energi panas. Fonon merupakan vibrasi (getaran) kisi kristal yang juga memindahkan energi panas. Konduksi di dalam logam ditentukan oleh jumlah elektron bebas pada kulit terluar atom penyusunnya. Untuk material intan, proses konduksi diatur oleh fonon, karena elektron bebas tidak tersedia, dan nomor atom karbon (C) yang kecil memperbesar vibrasi kisi. Sebaliknya, polimer merupakan konduktor panas yang buruk karena elektron bebas tidak tersedia dan ikatan kimia sekunder (gaya Van der Waals) antara molekul sangat lemah sehingga sulit bagi fonon untuk bergerak dari molekul yang satu ke molekul lainnya. Keramik, di lain pihak, cenderung lebih konduktif daripada polimer, dan gerakan elektron dan/atau ion berperan pada konduksi termal.(subaer 2007a)

## **2.3.Fiber Bragg Grating (FBG)**

### **2.3.1. Defenisi Fiber Bragg Grating**

Serat optik merupakan media transmisi atau pandu gelombang cahaya berbentuk silinder yang dikembangkan diakhir tahun 1960-an sebagai jawaban atas perkembangan sistem komunikasi yang semakin lama membutuhkan *bandwith* yang besar dengan laju transmisi yang tinggi. Serat optik terbuat dari bahan dielektrik. Di dalam serat inilah energi cahaya yang dibangkitkan oleh sumber cahaya disalurkan sehingga dapat diterima di ujung unit penerima (*receiver*).

Serat optik banyak dibuat dari kaca atau bahan silika ( $\text{SiO}_2$ ), yang biasanya diberi *doping* untuk menaikkan indeks biasnya. Fiber Bragg grating adalah perangkat yang umum digunakan dalam telekomunikasi dan teknologi sensor. Bragg grating merupakan suatu jenis kisi (bragg) yang dapat difungsikan sebagai reflektor optik. Jika kisi bragg ini disusupkan pada suatu serat optik. Maka akan terbentuk fiber bragg grating (Daud et al. 2011). Fiber Bragg grating ini merupakan suatu media transmisi yang difungsikan sebagai reflektor optik. Dalam serat optik kisi bragg tersusun seperti segmen-segmen yang terdistribusi dengan jarak yang sama. Adanya *grating* tersebut di dalam *fiber* menyebabkan *fiber bragg grating* merefleksikan panjang gelombang cahaya yang hanya memenuhi kondisi *bragg* dan mentransmisikan semua panjang gelombang yang lain (Kashyap 2010a).

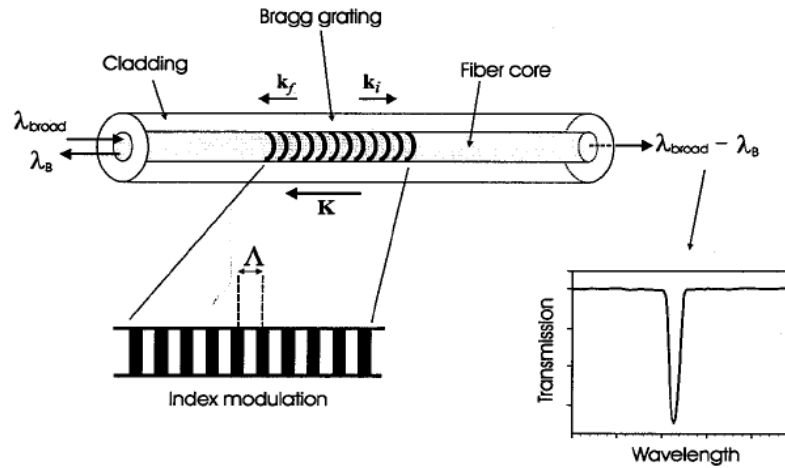


Gambar 2. 2 Struktur Fiber Bragg Grating Beserta Spectrum Transmisi dan Refleksinya

Mekanisme kerja dari FBG ditunjukkan pada gambar 2.2. Dalam inti (*core*) suatu fiber optik dibuat kisi-kisi yang mempunyai jarak antar kisi tertentu. Kisi-kisi ini, oleh cahaya, dipandang sebagai reflektor yang membentuk resonator, dimana puncak transmisi dari resonator tersebut tergantung jarak antar kisi-kisinya. Ketika cahaya melalui daerah yang secara periodik berubah-ubah dari indeks refraktif tinggi dan rendah, maka sebagian cahaya akan direfleksikan untuk

setiap panjang gelombang yang memenuhi kondisi *Bragg*, sedangkan wilayah yang lainnya akan ditransmisikan. Panjang gelombang yang ditransmisikan disebut panjang gelombang *Bragg*.

*Bragg wavelength* sangat tergantung oleh suhu dari elemen FBG nya. Oleh karena satu elemen dari FBG hanya memantulkan cahaya dalam spektrum yang sempit maka elemen FBG dapat dikombinasikan beberapa elemen membentuk beberapa sensor atau disebut multiplexing sensor sistem.(Kashyap 2010a)



Gambar 2. 3 Ilustrasi dari Fiber Bragg Grating

Pada prinsipnya, pada kisi bragg, cahaya sebagai partikel yang memiliki momentum dan energy karena pada prinsipnya pada bragg grating terdapat interaksi cahaya sebagai tumbukan antara foton. Dalam proses tumbukan, hukum kekekalan energi dan momentum harus terpenuhi. Hukum kekekalan energy mensyaratkan bahwa frekuensi radiasi insiden dan radiasi yang dipantulkan adalah sama ( $\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$ ).

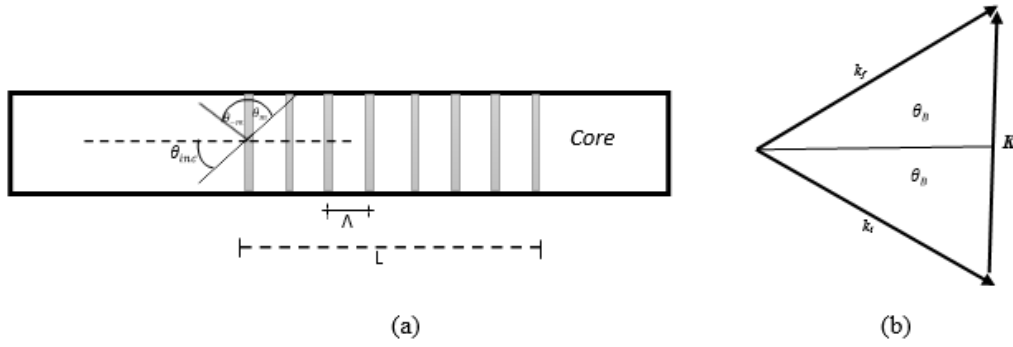
Hukum kekekalan momentum mensyaratkan bahwa *wavevector incident* (Vektor Gelombang datang)  $\mathbf{k}_i$ , ditambahkan dengan *Wavevector* kisi  $\mathbf{K}$ , sama dengan *Wavevector* hamburan  $\mathbf{k}_f$ , (Kashyap 2010b) secara sederhana dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\hbar\mathbf{k}_i + \hbar\mathbf{K} = \hbar\mathbf{k}_f \quad (2.7)$$

$$\mathbf{k}_i + \mathbf{K} = \mathbf{k}_f \quad (2.8)$$



Pada kondisi bragg,  $|K| \ll |k_i|$  sehingga wave vector  $K_f = -K_i$ , oleh karena itu, segitiga wave-vektor momentum diperlihatkan pada gambar 2.4 dan persamaan di atas dapat dinyatakan sebagai berikut :



Gambar 2. 4 (a) Proses Refleksi Dan Refraksi Cahaya Dalam FBG (b) Wave Vector Diagram (Banerjee and Poon 1991)

$$\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} + \frac{2\pi}{\Lambda} = -\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \quad (2.9)$$

$$2 \left( \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.10)$$

Dimana  $\lambda_B$  adalah panjang gelombang kisi bragg yang merupakan panjang gelombang masukan yang akan dipantulkan kembali oleh kisi bragg, dan  $n_{eff}$  adalah indeks bias efektif dan Dimana  $\Lambda$  adalah jarak antara bidang kisi.

Dari gambar 2.4 (b) dijelaskan bahwa interaksi cahaya dalam medium antara sinar datang dan sinar hamburan dengan sudut sebesar  $2\theta_B$ . Dimana  $\theta_B$  merupakan sudut bragg, dan rumus difraksinya diebut difraksi bragg, menyerupai prinsip pada X-Ray difraksi pada Kristal. Persamaan sudut bragg  $\theta_B$  dapat dijelaskan dari gambar 2.4 b di atas dengan menggunakan prinsip hukum kosinus pada segitiga dengan penjabaran sebagai berikut :

$$K^2 = (k_f)^2 + (k_o)^2 - 2k_f k_o \cos 2\theta_B$$

Karena  $k_f = k_o$ , maka :

$$\begin{aligned}
K^2 &= 2(k_o)^2 - 2k_o^2 \cos 2\theta_B \\
&= 2k_o^2 (1 - \cos 2\theta_B) \\
K^2 &= 4k_o^2 \sin^2 \theta_B \\
\frac{K^2}{4k_o^2} &= \sin^2 \theta_B \\
\sin \theta_B &= \frac{K}{2k_o} \tag{2.11}
\end{aligned}$$

Karena  $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ , dan  $k_o = \frac{2\pi}{\lambda_o}$

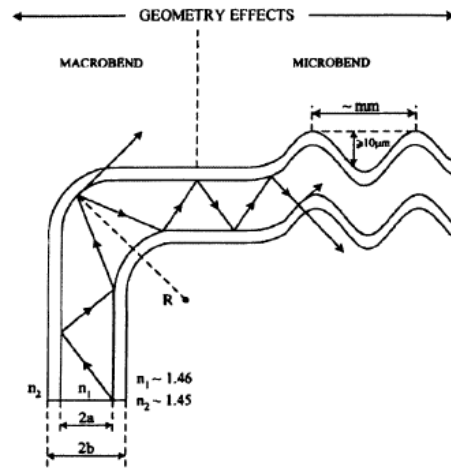
$$\sin \theta_B = \frac{K}{2k_o} = \frac{\lambda_o}{2\Lambda} \tag{2.12}$$

Karena vector  $\mathbf{K}$  dapat berorientasi pada sudut  $\pm \frac{\Lambda}{L}$ , dimana  $L$  merupakan panjang bragg dan  $\Lambda$  adalah periode kisi. Pada kondisi tersebut hanya satu cahaya difraksi yang dihasilkan ( $k_f$ ), maka persamaan diatas menjadi (Banerjee and Poon 1991) :

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda_o}{\Lambda} &\gg \frac{\Lambda}{L} \\
\lambda_o &\gg \frac{\Lambda^2}{L} \tag{2.13}
\end{aligned}$$

### 2.3.2. Pengaruh Strain dan Temperatur pada FBG

Kelengkungan serat optik yang menyebabkan sebagian sinar datang pada perbatasan core dan *cladding* dengan sudut lebih kecil daripada sudut kritis menyebabkan sebagian sinar terbiaskan ke *cladding*. Atenuasi akibat kelengkungan serat otik dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pembengkokan makro (*macrobending*) dan pembengkokan mikro (*microbending*). (Grattan and Meggit 2000a) Kedua jenis pembengkokan dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Kelengkungan Fiber Optic Akibat Makrobending dan Mikrobending

Secara matematis, koefisien atenuasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{10}{L} \text{Log} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \text{ dB/km} \quad (2.14)$$

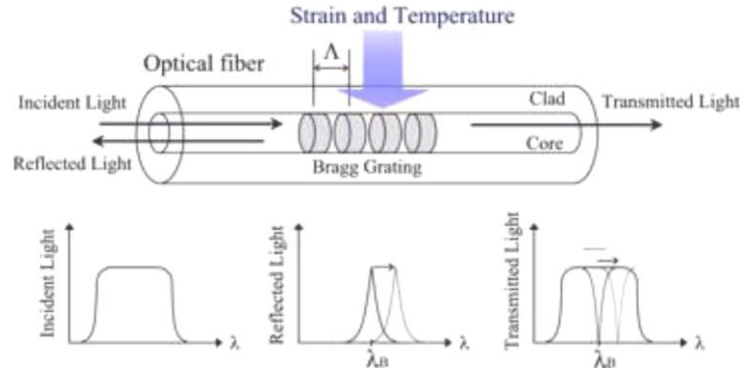
Dimana :

- $\alpha$  : Koefisien Atenuasi,
- $L$  : Panjang Fiber Optik,
- $P_{in}$  : Daya Input Fiber Optik,
- $P_{out}$  : Daya Output Fiber Optik,

Atenuasi serat biasanya disebabkan oleh karena absorpsi, hamburan(*scattering*) dan *mikro-bending*. Semakin besar *atenuasi* berarti semakin sedikit cahaya yang dapat mencapai detector. Atenuasi diakibatkan microbending pada fiber optic sesuai dengan persamaan berikut :

$$\alpha_{\mu} = K \left( \frac{a}{a_c} \right) (NA)^{-4} \quad (2.15)$$

Dimana  $a$  dan  $a_c$  adalah jari-jari inti dan cladding, NA adalah Numerical Aperture dan K adalah konstanta proporsional.(Grattan and Meggit 2000a)



Gambar 2. 6 Fiber Bragg Grating Akibat Pengaruh Suhu dan Strain

Resonansi kisi bragg, yang merupakan pusat panjang gelombang dari cahaya yang dipantulkan kembali dari kisi bragg dipengaruhi oleh indeks bias efektif dari inti dan perioditas kisi. Indeks bias efektif akan terpengaruh oleh perubahan strain dan temperatur. Perubahan panjang gelombang bragg akibat temperature dapat dijabarkan dari persamaan berikut :

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2 \frac{dn_{eff}\Lambda}{dT}$$

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + 2n_{eff} \frac{\delta \Lambda}{\delta T}$$

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{2\Lambda}{2n_{eff}\Lambda} \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + \frac{2n_{eff}}{2n_{eff}\Lambda} \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \quad (2.16)$$

Dimana :

$$\frac{d\lambda_B}{dT} \Delta T = \Delta \lambda_B \quad (2.17)$$

Maka persamaan pergeseran panjang gelombang bragg dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \right) \Delta T \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{n_{eff}} \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} = \alpha_n \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{\delta \Lambda}{\delta T} = \alpha_{\Lambda} \quad (2.20)$$

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha_n + \alpha_{\Lambda}) \Delta T \quad (2.21)$$

Dimana

$\alpha_{\Lambda}$  = koefisien ekspansi thermal (CTE) dari fiber (  $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  untuk bahan silica).

$\alpha_n$  = koefisien termo-optik fiber, jika core fiber dari bahan silica sebesar  $8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  (Grattan and Meggit 2000a)

$\Delta T$  = Perubahan Temperatur

$n_{eff}$  = indeks bias efektif

$\Lambda$  = periode kisi /jarak kisi

#### **2.4. Optical Spektrum Analyzer (OSA)**

Optical spektrum analyzer adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur densitas spektral dari sinyal gelombang cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Ini merupakan salah satu dari banyak kegunaan dari instrumen pada sistem fiber optik dan perangkat/device pengukuran, terutama ketika *wavelength division multiplexing* diperkenalkan ke dalam sistem yang memiliki chanel data yang berbeda yang dibawa oleh panjang gelombang yang berbeda pula. Untuk dapat mengidentifikasi panjang gelombang dari sinyal optik, Optical Spectrum analyzer sering digunakan untuk mencari level daya dari sinyal optik pada masing-masing chanel panjang gelombang, mengevaluasi sinyal optik-to noise ratio dan optik crosstalk dan memeriksa bandwidth optik dari pembawa optik yang dimodulasi (Hui and O'sullivan 2009).

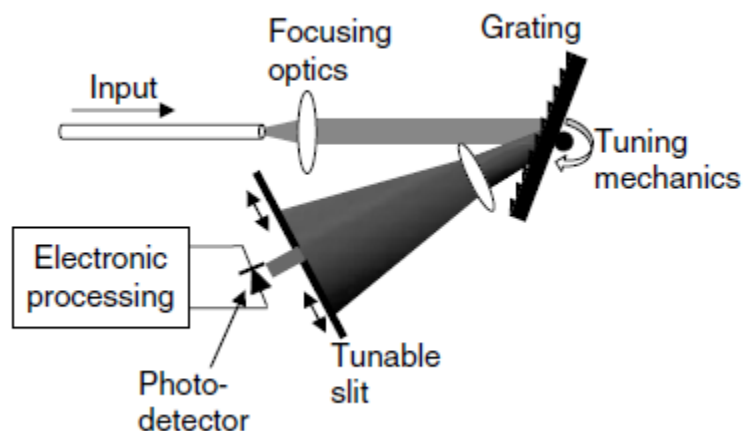
Parameter yang paling penting yang disediakan OSA adalah *optical spektral density* dengan panjang gelombang. Unit dari optical spektral density sering dilambangkan dalam watt per hertz (W/Hz), yang didefinisikan sebagai daya optik dalam bandwidth frekuensi (Hertz) yang diukur pada panjang gelombang tertentu.



Gambar 2. 7 Optical Spectrum Analyzer (OSA type AQ6370C Yokogawa)

Sebuah OSA mengukur daya optik sinyal pada berbagai panjang gelombang. Meskipun ada berbagai jenis filter optik seperti kisaran panjang gelombang yang lebar, resolusi optical yang baik, range dinamic yang tinggi, dan sebagainya, namun yang paling umum menggunakan filter optik untuk aplikasi OSA adalah difraksi grating. Grating yang memiliki kualitas tinggi dapat memiliki rentang panjang gelombang yang lebih luas dan resolusi yang cukup baik, dan dapat disetel secara mekanik untuk mencapai pilihan satuan panjang gelombang(Hui and O'sullivan 2009).

Inti dari optical spektrum analyzer berbasis kisi monokromator secara skematik digambarkan sebagai berikut. Dalam konfigurasi dasar optik ini, sinyal optik input di ubah menjadi sinar terfokuskan melalui sistem lensa dan diteruskan ke kisi-kisi.



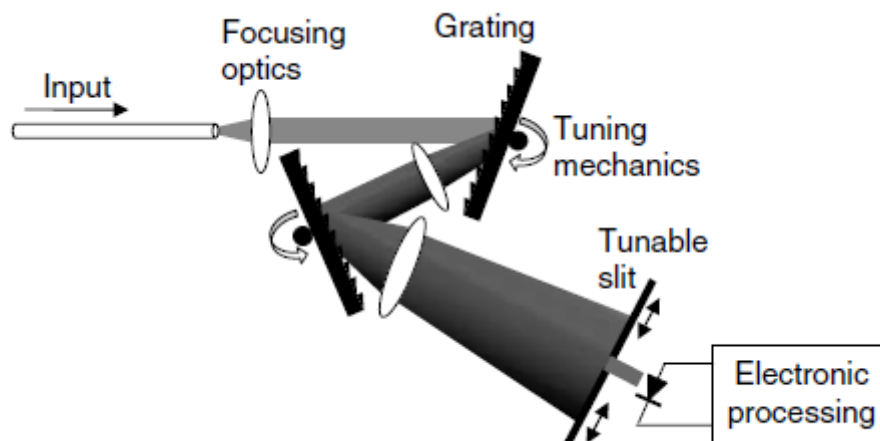
Gambar 2. 8. Konfigurasi Dasar dari Optical Spectrum Analyzer

Kisi difraksi dan komponen panjang gelombang yang mendispersi dari sinyal optik ke sudut difraksi yang berbeda. Tunable mechanical aperture (celah) digunakan untuk memilih berbagai komponen panjang gelombang dalam spektrum sinyal dan sebuah fotodioda mengkonversi komponen panjang gelombang menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini kemudian diperkuat, didigitalkan dan diakuisisi atau ditampilkan pada layar OSA. Fotodioda mengukur daya optik total dalam spektral bandwidth yang ditentukan oleh lebar celah. Dengan mempertimbangkan fungsi transfer kisi dan lebar dari optical aperture, nilai yang terukur dapat dikonversi menjadi densitas spektral daya optik dalam satuan  $\text{mW/nm}$ , atau  $\text{dBm/nm}$  (Hui and O'sullivan 2009).

Resolusi Spektral dan rentang pengukuran dinamis merupakan dua parameter yang paling penting dari OSA, dan keduanya tergantung pada fungsi transfer kisi. Kedua parameter ini dapat ditingkatkan dengan :

1. Meningkatkan densitas groove-line dari kisi.
2. Memperbesar ukuran dari beam yang meluncurkan ke kisi.

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kinerja OSA adalah dengan meneruskan sinyal optik ke dalam 2 kali kisi. Seperti pada gambar berikut :

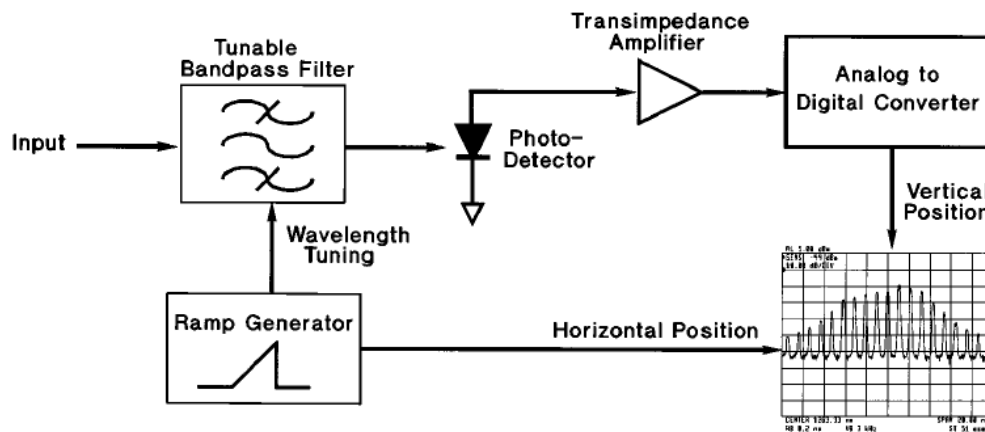


Gambar 2. 9 Optical Spectrum Analyzer (OSA) Berbasis Double-Pass Monocromator

Secara prinsip OSA memiliki prinsip yang sama. Dalam desain ini, sinyal optik dilipat gandakan di dalam sistem optik dan didifraksi oleh kisi sebanyak dua kali. *Half waveplate* digunakan untuk memutar keadaan polarisasi sebesar  $90^\circ$  diantara dua pola difraksi.

Cahaya input masuk melewati interferometer yang kemudian menghasilkan spektrum komponen individual. Sinyal optik tersebut kemudian diubah menjadi arus listrik yang sebanding dengan daya optik yang masuk oleh fotodetektor.

Arus dari fotodetektor diubah menjadi tegangan oleh amplifier transimpedance yang kemudian digitalisasi. Sinyal yang tersisa selama proses juga digitalisasi. Sinyal kemudian digambarkan dalam bentuk vertikal atau data amplitudo. Generator acak menentukan lokasi horizontal dari jejak yang bergerak dari kiri ke kanan. Generator tersebut juga mencocokkan filter optik agar panjang gelombang resonansi proporsional terhadap posisi horizontalnya. Hasilnya merupakan daya optik terhadap panjang gelombang. Lebar dari setiap moda laser yang ditunjukkan merupakan fungsi dari resolusi spektral dari panjang gelombang yang dapat diatur pada filter optik.



Gambar 2. 10 Diagram Blok Dasar OSA



## **2.5.Karakteristik Sensor**

Karakteristik Sensor dilakukan untuk mengetahui kinerja system sensor yang telah dirancang. Karakteristik sensor dapat dijelaskan sebagai berikut :

### **2.5.1. Kalibrasi Sensor**

Pengukuran adalah berupa proses menyatakan suatu angka secara empiric dan objektif pada kejadian nyata sedemikian rupa, sebagai angka tadi dapat menjadikan gambaran yang jelas mengenai objek atau kejadian tersebut. Setiap instrumen alat ukur atau sensor sebelum digunakan secara massal, terlebih dahulu harus diuji cobakan untuk melihat keakuratan dari sensor yang telah dibuat. Selain itu setelah dilakukan uji coba maka karakteristik dari sensor dapat ditentukan. Kalibrasi merupakan suatu kegiatan untuk menentukan keberadaan konvensional nilai penunjukkan alat ukur dan bahan ukur berdasarkan standar(Douglas 1999). Umumnya yang banyak digunakan berupa metode kalibrasi perbandingan untuk membandingkan kalibrator standar alat ukur terhadap beban ukur yang dipakai, baru dilakukan perhitungan deviasi berdasarkan standar.

Ketidakpastian pengukuran adalah proses mengaitkan sesuatu angka secara empirik dan obyektif pada sifat-difat obyek atau kejadian nyata sedemikian rupa sehingga angka tadi dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai obyek atau kejadian tersebut. membuat gambaran/deskripsi; memperkirakan/meramalkan; mengadakan komunikasi; memutuskan; mengatur/mengendalikan, dan memberikan reaksi. Hasil pengukuran harus mencantumkan suatu perkiraan yang menggambarkan seberapa besar kesalahan yang mungkin terjadi, dalam batas-batas kemungkinan yang wajar. Nilai ini sekaligus menunjukkan kualitas pengukuran. Semakin kecil nilai perkiraan itu, berarti semakin baik pula kualitas pengukurannya(Sulaeman and Kusnadi 2011).

Kalibrasi adalah suatu kegiatan untuk menentukan kebenaran konvensional nilai penunjukkan alat ukur dan bahan ukur. Proses kalibrasi dari sensor dapat menggunakan beberapa cara diantaranya: 1) Membandingkan sensor yang telah dibuat dengan alat ukur yang telah terstandar baik Nasional maupun Internasional. 2) Menggunakan metode statistik (melakukan pengukuran secara berulang ulang). 3) Menggunakan metode simulasi. Dari beberapa cara kalibrasi, yang umum

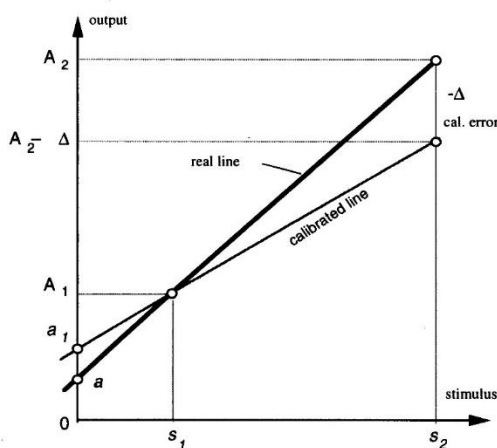
dilakukan adalah cara pertama yaitu dengan membandingkan hasil pengukuran dari sensor yang telah dibuat dengan alat ukur yang telah terstandar.

Kalibrasi diperlukan untuk 1) perangkat baru, 2) suatu perangkat setiap waktu tertentu, 3) suatu perangkat setiap jam operasi, 4) ketika suatu perangkat mengalami tumbukan atau getaran yang berpotensi mengubah kalibrasi, dan 5) ketika hasil observasi dipertanyakan. Pada umumnya kalibrasi merupakan proses menyesuaikan luaran dari alat ukur/ sensor agar sesuai dengan nilai besaran dari standar yang digunakan dalam akurasi tertentu.

#### 2.5.2. Error Kalibrasi

Setiap pengukuran pasti mengandung kesalahan (*error*). Kesalahan tersebut ditimbulkan oleh berbagai faktor diantaranya adalah: operator, instrumen ukur, kondisi lingkungan, obyek ukur, metode pengukuran. Komponen pengukuran dapat dibagi menjadi beberapa kelompok: standar atau acuan: benda ukur, peralatan, metode, lingkungan, personil atau perilaku pengukuran. Perbedaan antara hasil pengukuran dan besaran yang sebenarnya disebut sebagai ralat ukur. (Sulaeman and Kusnadi 2011)

Error kalibrasi ditentukan dari grafik perbandingan stimulus terhadap sinyal keluaran. Kesalahan kalibrasi ditentukan dari hasil perhitungan *error slope* dan *error intercept* yang dihasilkan dari dari proses kalibrasi (Fraden 2004).



Gambar 2. 11 Penentuan Error Kalibrasi

*Error intercept* dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\delta_a = \alpha_1 - \alpha = \frac{\Delta}{s_2 - s_1} \quad (2.20)$$

Sedangkan *error slope* dapat dituliskan dengan persamaan :

$$\delta_b = -\frac{\Delta}{s_2 - s_1} \quad (2.21)$$

Ralat ukur adalah perbedaan antara hasil ukur dengan nilai yang sebenarnya. Untuk mengetahui berapa besar ketidakpastian dari hasil ukur, maka harus diperkirakan besar ralat ukur. Dengan kata lain, untuk setiap pengukuran selain hasil ukur juga ralat dari hasil ukur harus ditentukan. Secara umum sistematika penulisan laporan pengukuran adalah:

$$x = (x_0 \pm \Delta x) [x] \quad (2.22)$$

dengan:

$x$  = besaran yang diukur

$[x]$  = satuan besaran fisis  $x$

$(x_0 \pm \Delta x)$  = hasil ukur dan ketidakpastiannya

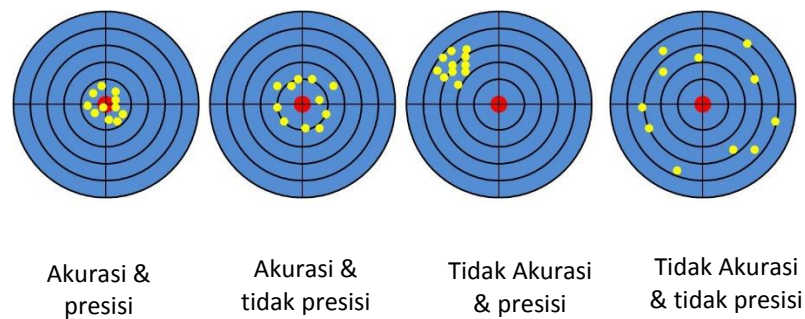
Untuk melihat sejauhmana ketelitian alat ukur yang digunakan maka dapat dilihat dengan menggunakan:

$$\% \text{ error} = \left| \frac{(\text{Hasil teori} - \text{hasil pengukuran})}{\text{Hasil teori}} \right| \times 100\% \quad (2.23)$$

### 2.5.3. Akurasi

Akurasi adalah nilai yang menyatakan tingkat kebenaran hasil pengukuran sesuai dengan standard. Untuk mengetahui akurasi sebuah *linear transducer* diperlukan kalibrasi. (Li et al. 2001) Akurasi tidak dapat diperoleh dengan hanya menghitung dari data ukur, nilai standard harus tersedia sebagai acuan berpasangan dengan data ukur sebagai nilai pembanding. Besarnya nilai akurasi diperoleh dengan melakukan pengukuran berulang berdasarkan standard dan

kalibrator yang tertelusur ke standard lebih tinggi. Untuk mendapatkan akurasi tinggi maka diperlukan kepresisian tinggi pula. Presisi adalah kemampuan menghasilkan nilai ukur yang konsisten. Dalam pengukuran mungkin diperoleh kepresisian tinggi akan tetapi belum tentu akurat hasilnya. Akurasi adalah ukuran kualitas seberapa dekat nilai yang ditunjukkan instrumen ke nilai sebenarnya sesuai dengan standard, semakin dekat nilainya dengan standard artinya peralatan tersebut semakin akurat seperti terlihat pada gambar berikut tentang sebaran hasil hasil ukur(Purwowibowo 2008).



Gambar 2. 12 Ilustrasi Akurasi dan Presisi

Terdapat dua cara untuk meningkatkan akurasi. Pertama menghindari kesalahan yaitu dengan menghilangkan sumber-sumber kesalahan ketika alat sedang dirancang dan dibuat. Ini dilakukan dengan memakai bahan kualitas tinggi dan proses rekayasa yang ketat untuk mendapatkan toleransi dimensional yang sekecil mungkin. Cara kedua melalui kompensasi guna mengurangi pengaruh sumber-sumber kesalahan setelah alat dirakit. Pada cara kedua adalah dengan memprediksi kesalahan final berdasarkan model kesalahan sistem, khususnya pada *transducer* dan kemudian melakukan kompensasi, cara ini lebih mudah dan berdampak langsung pada peningkatan akurasinya.(Li et al. 2001)

#### 2.5.4. Linearitas

Sensor idealnya menghasilkan sinyal keluaran yang berubah secara kontinyu sebagai tanggapan terhadap masukan yang berubah secara kontinyu. Sebagai contoh, sebuah sensor panas dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan

panas yang dirasakannya. Dalam kasus seperti ini, biasanya dapat diketahui secara tepat bagaimana perubahan keluaran dibandingkan dengan masukannya berupa sebuah grafik. Suatu sistem dikatakan linier jika hubungan input dan output merupakan suatu garis lurus.(Fraden 2004)

#### 2.5.5. *Repeatability*

*Error repeatability* adalah kemampuan sensor ketika digunakan untuk melakukan pengukuran berulang. Penyebab error repeatability adalah sensor tidak mampu memberikan nilai yang sama pada kondisi yang identic. Error repeatability dinyatakan sebagai :

$$\delta = \frac{\Delta}{F_s} \times 100\% \quad (2.24)$$

Dimana :

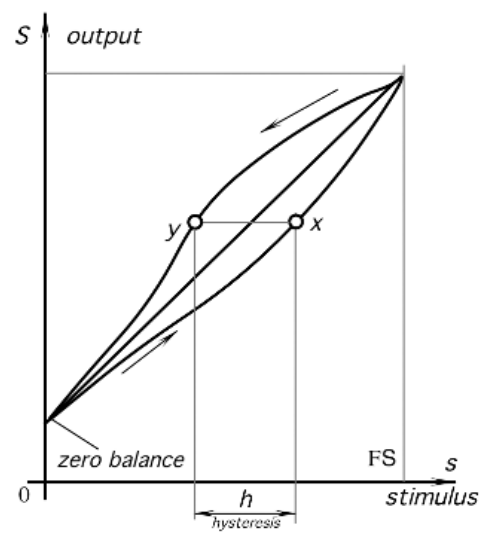
$\delta$  = *error repeatability* (%)

$\Delta$  = daerah dengan stimulus berbeda memberikan tegangan yang mirip

$F_s$  = Jangkauan pengukuran

#### 2.5.6. *Hysteresis*

Hysteresis adalah perbedaan untuk nilai pembacaan sensor untuk suatu nilai masukan tertentu bila nilai masukan tersebut didekati dengan nilai yang lebih rendah dan yang lebih tinggi. Sebagai contoh, sensor perpindahan ketika objek bergerak dari kiri ke kanan pada titik tertentu menghasilkan tegangan yang berbeda sebesar 20 mV ketika objek bergerak dari kanan ke kiri. Jika sensitivitas sensor adalah 10 mV / mm, maka kesalahan histeresis dalam unit perpindahan adalah sebesar 2 mm(Fraden 2004). penjelasan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 13 Kurva Hysteresis

Histerisis dinyatakan sebagai persentase deviasi maksimum (antara kurva naik dan kurva turun) terhadap nilai skala penuh.

## BAB 3

### METODA PENELITIAN

#### 3.1. Jenis Penelitian dan Tempat Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan merupakan jenis penelitian laboratorium dan tempat penelitian di Laboratorium Fisika Instrumentasi ITS

#### 3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini terdiri atas dua bagian yaitu perancangan Head Sensor dan perancangan Sistem Pengukuran Temperatur

Alat dan Bahan Perancangan Head Sensor adalah

1. Stainless Tube
2. Keramik Mullite dan Keramik Geopolimer
3. FBG Polymide Fiber



Gambar 3. 1 *Fiber Bragg Grating*(FBG) dengan C.W. 1550 nm

FBG length	10 mm
Centre Wavelength	1550 +/- 0.5 nm
Reflectivity	>80 %
Fiber type	SMF28-C polyimide fiber
recoating type	Polyimide
Connector	FC/PC

4. Thermocouple Type K
5. *Kaplam Tape*

Alat dan bahan dalam perancangan sistem pengukuran Temperatur adalah

1. Furnace/Oven Pemanas/Heater
2. Optical spectrum Analyzer (OSA Agillent 86142 B)
3. Fiber Optik Single Mode
4. Thermocouple Type K
5. Temperature controller Autonics TCN4NS

### 3.3. Parameter Observasi

- a. Pergeseran  $\lambda_B$  yang terlihat pada OSA
- b. Intensitas Transmisi
- c. Temperatur *Furnace*

### 3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur Penelitian dibagi menjadi dua tahapan penelitian. Pertama adalah Pembuatan Probe (Head Sensor). Tahapan yang kedua Perancangan sistem pengukuran Temperatur. Secara rinci akan dijelaskan sebagai berikut :

#### 3.4.1. Pembuatan Probe (Head Sensor)

Pembuatan Probe (Head sensor) diawali dengan penentuan jenis keramik yang digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan 2 jenis keramik. Yaitu keramik komersil berbahan *mullite* dan yang kedua keramik geopolimer berbahan metakaolin yang disintesis di Laboratorium Fisika Material Universitas Negeri Makassar. Keramik yang digunakan adalah bahan keramik dengan konduktivitas thermal yang rendah serta memiliki ketahanan terhadap temperature yang tinggi.



Keramik mullite memiliki koefisien muai thermal (CTE) sebesar  $5.7 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$  (datasheet morgan advanced Ceramic, Phytagoras). Untuk mengetahui koefisien ekspansi thermal geopolimer maka dilakukan pengujian dengan Thermomechanical Analysis (TMA) di Laboratorium Energi ITS. Keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin tahan terhadap temperatur tinggi dan memiliki konduktivitas Thermal yang rendah (Subaer 2007a). Desain probe sensor ditunjukkan pada gambar 3.2.



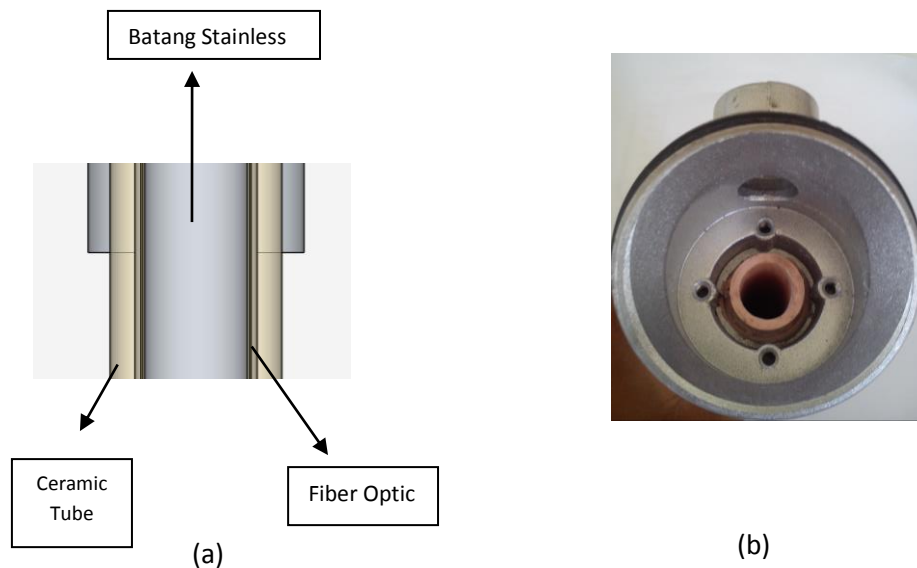
(a)



(b)

Gambar 3. 2 Rancangan Probe (Head Sensor) (a) Probe Keramik *mullite*.  
(b) Probe Keramik Geopolimer

Pada prinsipnya FBG akan dilengkungkan dalam ceramic tube yang sebelumnya dilengketkan dengan menggunakan *kaplam tape* pada batang stainless. Keramik geopolimer akan mereduksi temperatur tinggi dari sistem, maka FBG tetap terjaga pada temperatur yang rendah. Setelah FBG dilindungi oleh keramik. FBG yang digunakan memiliki konektor FC/PC yang akan dihubungkan dengan OSA Agilent 86142B. Keramik *mullite* adalah keramik komersil sedangkan keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin.



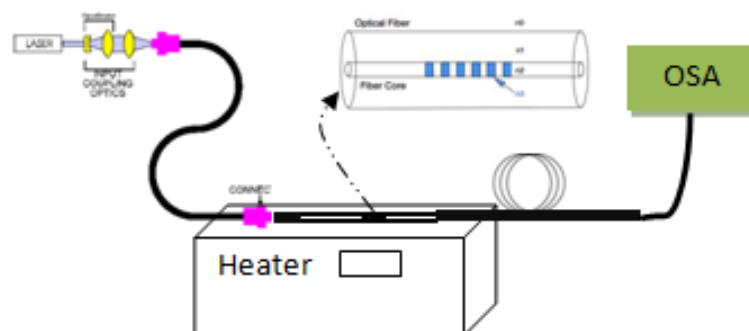
Gambar 3. 3 Gambar desain Probe sensor (a) desain letak FBG dalam probe  
(b) penampang atas Probe sensor

#### 3.4.2. Perancangan system pengukuran

Pengujian FBG dilakukan dengan dua tahapan pengujian, yaitu :

##### 1. Pengujian Karakteristik FBG terhadap Temperatur

Pada tahapan ini, pengujian ini dirancang dengan menempatkan FBG pada *Hot Plate* yang dirancang khusus dalam penelitian ini. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap kinerja FBG. Hal ini juga dilakukan untuk mengetahui range pengukuran FBG dan ketahanan fiber terhadap pengaruh temperatur.. Rancangan *set-up* pengujiannya dapat dilihat dari gambar 3.4



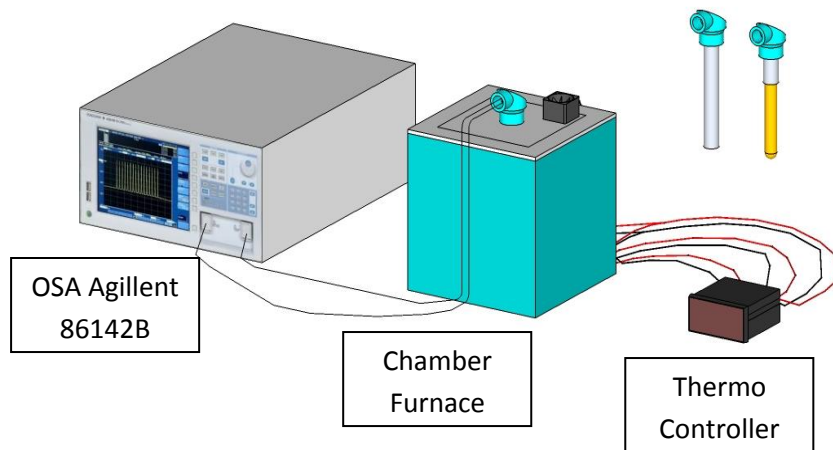
Gambar 3. 4.Rancangan Pengujian Karakteristik FBG

## 2. Pengujian Sensor Temperatur

Diagram of a thermocouple calibration chamber. The chamber is a rectangular box with a metal wall (Dinding Logam) and a ceramic plate (Plat Keramik) at the bottom. A thermocouple probe (Probe Sensor Keramik) is inserted into the center. A Type-K thermocouple (Thermokopel Tipe-K) is also shown. A heating element (Elemen Pemanas) is located at the bottom right. A sensor is mounted on the top surface.

31

Proses pengamatan dan pengukuran menggunakan optical spectrum analyzer (OSA) dengan outputnya berupa panjang gelombang dan intensitas transmisi dari fiber. Letak intensitas terendah pada *pit* spectrum transmisi pada OSA yang merupakan letak panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ). Thermocouple Type K merupakan calibrator yang akan mengontrol temperature system yang dirancang melalui Temperature controller. Secara prinsip diperlihatkan dari Gambar 3.6



Gambar 3. 6. Skema Set-up Sistem Pengukuran

Adapun langkah-langkah dalam men-*set-up* pengukuran yaitu sebagai berikut:

1. Memasukkan Probe yang telah terpasang FBG ke dalam Furnace yang telah dirancang.
2. Menghubungkan Kedua connector pada kedua ujung Fiber ke Source dan Inputan OSA
3. Mengatur panel tombol pada OSA
  - a. Menekan Outo measurement untuk mendeteksi panjang gelombang sinar laser yang melewati Fiber optic.
  - b. Mengatur center wavelength untuk mengetahui titik tengah panjang gelombang yang sudah dideteksi (C.W. 1550 nm)

- c. Mengatur SPAN untuk mengatur range pengamatan panjang gelombang pada sumbu x.
  - d. Mengatur Reference level yang menjadi acuan pada sumbu Y (satuan dBm/decibel milliwatt)
  - e. Menentukan Scale/Div
4. Menyalakan Thermo controller dan set up temperature yang diharapkan dengan menggunakan mode auto tuning pada thermocontroller.
  5. Setelah temperatur dalam furnace telah stabil maka spectrum transmisi pada OSA dapat disimpan dalam extension Csv dan Image, agar dapat diplotting dengan program yang lain.
  6. File CSV dan Image disimpan dalam Floppy disk dan selanjutnya dapat dipindahkan ke computer.

Secara garis besar tahapan penelitian mengikuti diagram alir pada yang digunakan dalam memperoleh data penelitian.

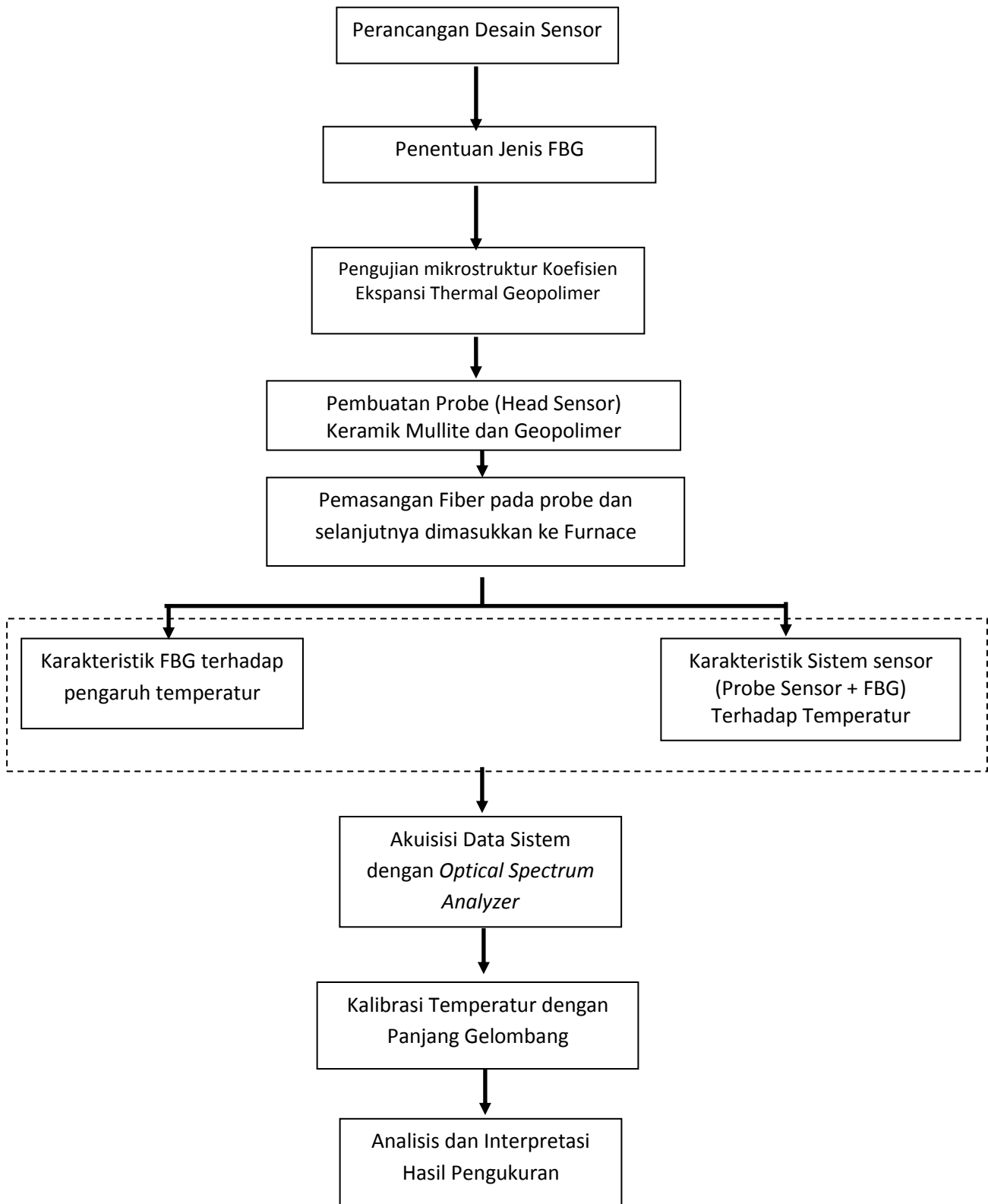
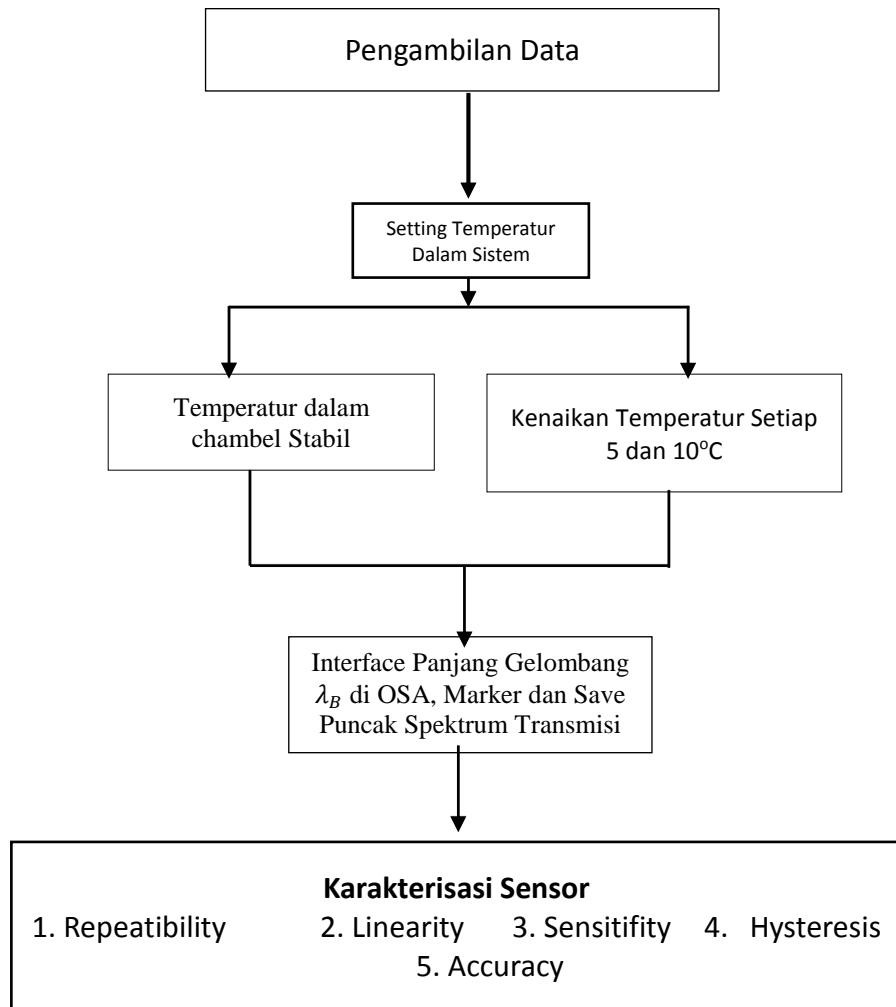


Diagram alir proses akuisisi data dan karakteristik sensor



## **BAB 4**

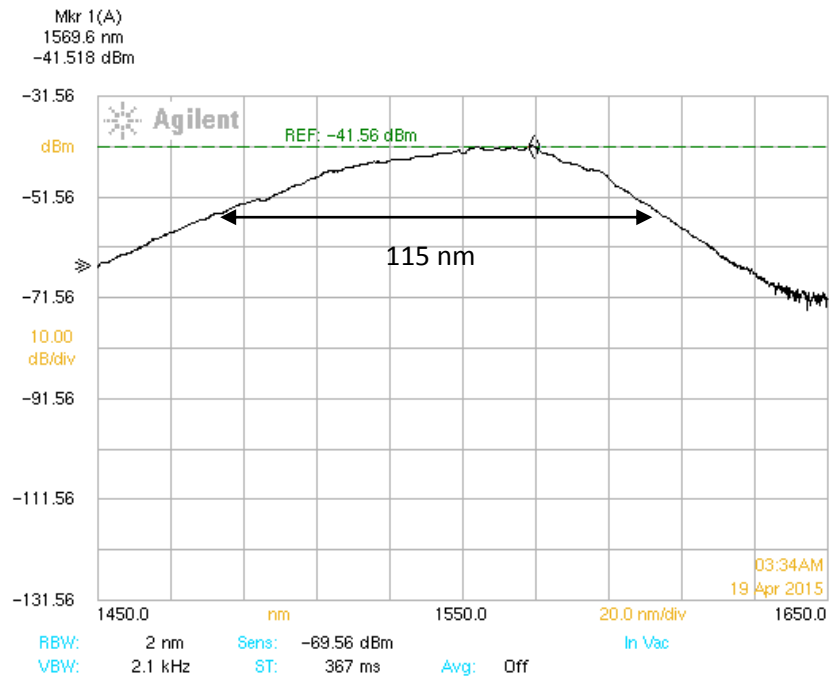
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Perancangan sensor temperatur tinggi telah dikembangkan dalam penelitian ini, dengan menggunakan Fiber Bragg Grating (FBG). Berdasarkan tujuan penelitian, maka pada BAB ini akan dibahas yaitu: pertama, karakteristik dari *Optical Spectrum Analyzer*(OSA) dan sumber cahaya(*source*) yang bersumber dari *internal wavelength calibrator* yang akan dipandu dalam fiber optic. Yang kedua adalah karakteristik dari Fiber Bragg Grating (FBG), karakteristik yang dimaksud adalah linearitas, repeatability dan hysteresis. Karakteristik FBG merupakan karakteristik dasar dari fiber itu sendiri, sebelum perancangannya sebagai sensor temperatur. Yang ketiga adalah merancang sebuah sistem pengukuran dan model probe sensor FBG dengan metode enkapsulasi dengan material keramik. Dan yang terakhir, menganalisis tentang perbedaan karakteristik dari variasi keramik yang digunakan sebagai sensor temperatur berbasis FBG. Keempat bagian tersebut akan dipaparkan sebagai berikut :

#### **4.1 Hasil Pengujian Karakteristik OSA dan Source OSA**

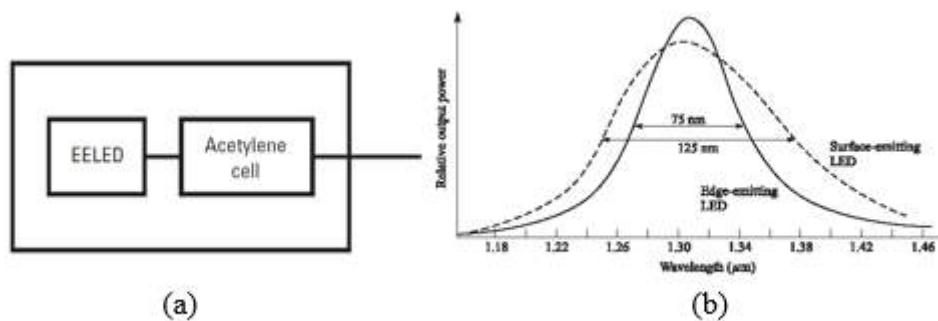
*Optical Spectrum Analyzer* (OSA) Agilent 86142B yang berada di laboratorium Fisika Instrumentasi ITS memiliki sumber cahaya internal yang disebut *Internal Wavelength Calibrator*. Pada prinsipnya cahaya yang bersumber dari *source* akan ditransmisikan melalui pandu gelombang cahaya yaitu fiber optic dan kemudian akan ditampilkan pada layar OSA dalam bentuk spektrum transmisi. Interface hasil eksperimen menunjukkan output berupa panjang gelombang (nm) dan intensitas Transmisi (dBm) seperti pada Gambar 4.1.





Gambar 4. 1.Interface FBG pada Optical Spectrum Analyzer (OSA agilent 86142 B)

Source yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Internal Wavelength calibrator* yang terdiri dari EELED (edge emitting LED) yang dilewatkan melalui gas *acetillent cell* seperti pada Gambar 4.2.

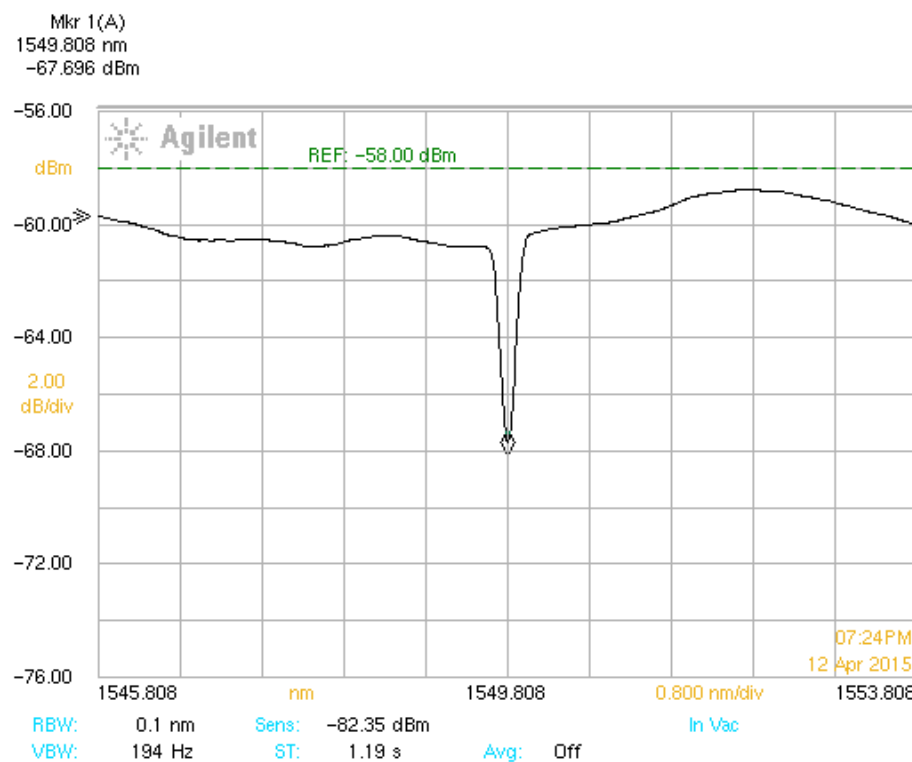


Gambar 4. 2.(a) Blok diagram *Internal Wavelength Calibrator* (b) Lebar Pita sumber LED

*Cell acetylene* akan menyerap sumber cahaya dari EELED dan akan diteruskan ke detector. Secara teoritik lebar pita untuk sumber EELED yaitu 115 nm. Pada Gambar 4.1, lebar pita dari source yang digunakan dalam penelitian ini, dimana lebar pita yang diperoleh sama dengan lebar pita EELED secara teoritik.

#### 4.2. Proses Pengukuran dan Karakteristik Fiber Bragg Grating (FBG)

Pada penelitian ini, FBG yang digunakan memiliki pusat panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ) sebesar 1550 nm produksi Technica SA US. FBG yang digunakan memiliki panjang *grating* 10 mm dan berbahan *polimide* sehingga mampu ditekukkan tanpa mengalami kerusakan struktural. Gambar 4.3 adalah spectrum transmisi dari FBG yang digunakan.



Gambar 4. 3. Spektrum Transmisi FBG C.W.  $1550 \pm 0.5$  nm

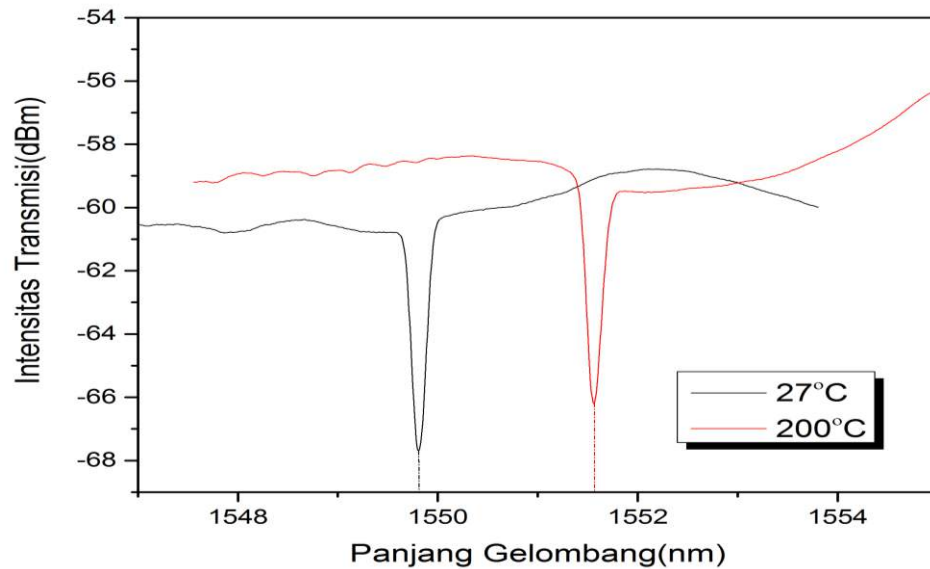
Pada Gambar 4.3 membuktikan keberadaan kisi pada FBG yang digunakan, dimana terdapat *pit* yang menunjukkan adanya spectrum cahaya yang dipantulkan akibat keberadaan kisi pada FBG. Akuisisi data spektrum transmisi

dilakukan untuk setiap kali pengukuran. Setiap pengukuran diperoleh 1001 iterasi yang menunjukkan bentuk spektrum transmisi dari sensor FBG. Tabel 4.1 adalah penyajian sebagian data iterasi, terdapat 20 data yang terdiri dari 5 data awal, 10 data disekitar  $\lambda_B$  dan 5 data akhir. Dari tabel tersebut diperoleh letak panjang gelombang bragg( $\lambda_B$ ) pada setiap spektrum transmisi yang diperoleh pada setiap pengukuran. Panjang gelombang bragg( $\lambda_B$ ) berada pada nilai intensitas transmisi terkecil pada spektrum transmisi yang diperoleh.

Tabel 4. 1. Hasil Iterasi Data Pergesaran Panjang Gelombang Bragg

Indeks	Intensitas Transmisi (dBm)	Panjang Gelombang (nm)
1	-59.72	1545.808
2	-59.716	1545.816
3	-59.721	1545.824
4	-59.73	1545.832
5	-59.727	1545.84
.	.	.
.	.	.
.	.	.
496	-66.59	1549.768
497	-66.923	1549.776
498	-67.303	1549.784
499	-67.53	1549.792
500	-67.663	1549.8
501	-67.696	1549.808
502	-67.655	1549.816
503	-67.544	1549.824
504	-67.405	1549.832
505	-67.171	1549.84
.	.	.
.	.	.
.	.	.
997	-59.963	1553.776
998	-59.974	1553.784
999	-59.979	1553.792
1000	-59.982	1553.8
1001	-59.983	1553.808

Uji berikutnya adalah pengaruh pengaruh temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ), sesuai dengan persamaan 2.18. Gambar 4.4 menunjukkan tentang pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran spektrum transmisi pada FBG.



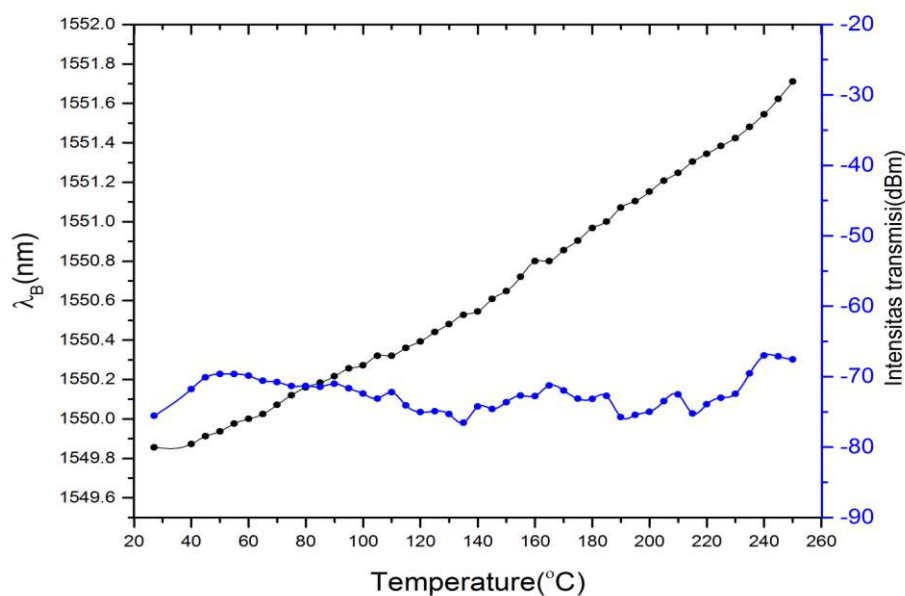
Gambar 4.4 Pengaruh Temperatur Terhadap Pergeseran Panjang gelombang Bragg

Pergeseran panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B$ ) diuji dengan melakukan pengukuran pada ruang *furnace* pada range temperatur 27°C-200°C. Pada keadaan awal, ruang *furnace* dikondisikan pada temperatur 27°C dan diperoleh  $\lambda_B$  sebesar 1549,808 nm. Setelah itu, temperatur *furnace* dinaikkan menjadi 200°C,  $\lambda_B$  mengalami pergeseran sebesar 1,752 nm sehingga  $\lambda_B$  menjadi 1551,56 nm. Hal ini menunjukkan bahwa ketika FBG mengalami proses pemanasan maka akan menyebabkan pergeseran panjang gelombang bragg karena perubahan indeks bias efektif ( $n_{eff}$ ) dan perubahan jarak antar kisi bragg ( $\Lambda$ ). (Grattan and Meggit 2000b)

Pergeseran panjang gelombang bragg dari FBG diakibatkan dua parameter yang mencirikan pengaruh suhu pada serat optik yaitu koefisien muai panas (*Thermal Expansion Coefficient = TEC*) dan koefisien termo-optik (*Thermo-Optic Coefficient = TOC*). Dimana koefisien muai panas mencirikan pemuaian fisik atau kontraksi volume material, sedangkan koefisien termo-optik mencirikan perubahan indeks bias sebagai respon dari perubahan suhu. Kedua variable dari

FBG yang akan mengalami peningkatan saat temperatur dinaikkan, sesuai dengan persamaan (2.19 dan 2.20)(Crips 2001).

Uji berikutnya adalah perubahan temperatur terhadap intensitas transmisi dan pergeseran panjang gelombang bragg FBG. Pengujian dilakukan dengan range temperatur 27-250°C. Data hasil pengujian perubahan temperatur terhadap intensitas transmisi dan pergeseran panjang gelombang bragg ditampilkan pada lampiran A. Hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5.Perbandingan Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Dan Intensitas Transmisi Dari FBG Akibat Pengaruh Temperatur

Selain berpengaruh secara linear terhadap pergeseran panjang gelombang, perubahan temperatur juga berpengaruh terhadap intensitas transmisi. Intensitas transmisi pada Gambar 4.5, berubah secara fluktuatif ketika temperatur mengalami kenaikan. Karakteristik yang sama juga diperoleh Parne Saidi Reddy dalam penelitiannya yang membahas tentang pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan intensitas refleksi dari FBG(Parne Saidi Reddy et al. 2010).

Dari hasil tersebut maka pada penelitian ini, dirancang sensor temperatur tinggi berbasis pergeseran panjang gelombang bragg  $\lambda_B$  dari FBG, tanpa memperhitungkan intensitas transmisi dari FBG. Pengujian karakteristik *bare* FBG terhadap temperatur meliputi linearitas, repeatibility dan hysteresis. Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan karakteristik awal dari FBG sebelum dilakukan proses enkapsulasi dengan keramik. Analisis karakteristik FBG yang dilakukan dengan analisis grafik dan analisis perhitungan. Analisis perhitungan meliputi nilai hysteresis, akurasi, dan repeatability dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Bentley 2005)(Fraden 2004)

$$\text{True}_{\text{out}} = \text{desired}_{\text{out}} \times \text{Actual}_{\text{out}} \quad (4.1)$$

$$\% \text{FSO} = \frac{\text{True}_{\text{output}} - \text{Actual}_{\text{Output}}}{Y_{\text{FSO}}} \quad (4.2)$$

$$\% \text{Hysteresis} = \% \text{FSO}_{\text{naik}} - \% \text{FSO}_{\text{turun}} \quad (4.3)$$

$$\% \text{repeatability} = \frac{\text{Stand.Deviasi max} - \text{Stand.Deviasi rata-rata}}{\text{Full Scale}} \times 100\% \quad (4.4)$$

Dimana FSO= Jangkauan pengukuran Output

$Y_{\text{FSO}}$ = Output Maksimum

$\text{FSO}_{\text{naik}}$ = FSO pada temperatur naik

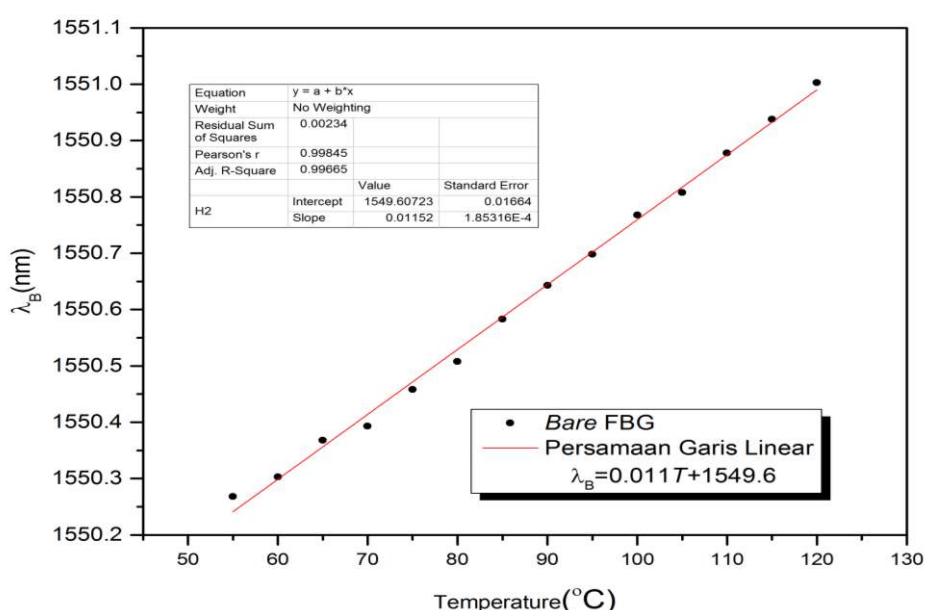
$\text{FSO}_{\text{turun}}$ =FSO pada temperatur turun

#### 4.2.1 Pengujian Linearitas dari FBG

Linearitas FBG diuji dengan melakukan pengukuran kenaikan temperatur pada lempengan panas (*hot plate*). *Hot Plate* yang digunakan dirancang khusus untuk penelitian ini, dengan sumber pemanas dari bahan stript heater, berdimensi 10 x 10 cm, dan daya yang digunakan 250 Watt. Proses pemanasan FBG diawali dengan menempatkan bagian bragg pada FBG dengan lempengan *stainless steel* dengan lebar yang sama dengan panjang bragg yaitu 10 mm. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa temperatur dari *hot plate* terdistribusi merata pada semua bagian dari FBG. Rentang pengukuran untuk uji linearitas adalah 55 – 120

°C dengan variasi kenaikan 5 °C. Sebagai kalibrator, digunakan thermokople tipe K dengan jangkauan pengukuran sebesar 400°C.

Untuk keperluan pengukuran, temperatur *hot plate* dikondisikan pada temperatur 50°C, pengukuran temperatur menggunakan termokople dan akuisisi data dilakukan setiap kenaikan 5°C. Data yang diperoleh dari FBG adalah data pergeseran panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ) yang diamati pada OSA. Hasil pengukuran linearitas diperlihatkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 6. Persamaan Garis Linear pada Pergeseran panjang gelombang Bragg Pada Bare FBG

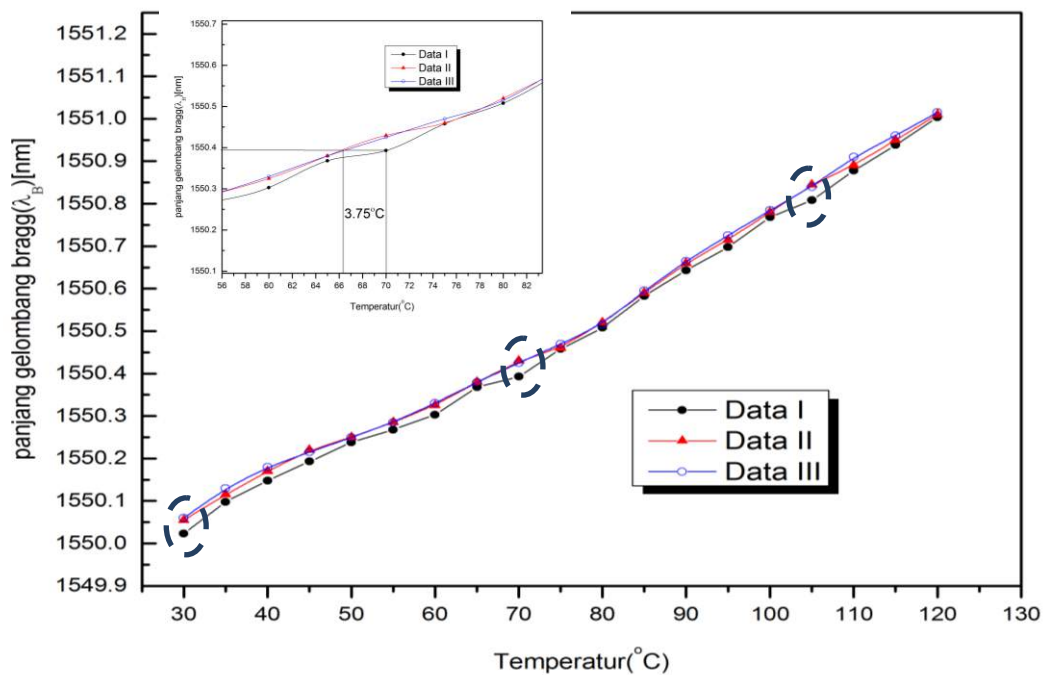
Data hasil pengujian *bare* FBG terhadap pengaruh kenaikan temperatur terdapat pada lampiran B. Dari grafik pada Gambar 4.7, terdapat pergeseran panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ) yang terbaca di OSA saat FBG mengalami kenaikan temperatur. Pada temperatur 55°C, puncak  $\lambda_B$  pada OSA teramati sebesar 1550.268 nm. Ketika temperatur *hot plate* dinaikkan secara perlahan, *pit* spektrum transmisi akan mengalami pergeseran sampai pada batas pengukuran sebesar 120°C dan diperoleh  $\lambda_B$  sebesar 1551.003.

Berdasarkan kurva yang diperoleh pada Gambar 4.8, diperoleh persamaan garis linear yaitu  $\lambda_B = 0.0117T + 1549.6$ . Sensitivitas dari FBG diperoleh dengan

mendiferensialkan persamaan garis linear tersebut terhadap temperatur. Maka diperoleh sensitivitas FBG sebesar  $11,52 \pm 0,18 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ . Dengan menggunakan persamaan garis linear pada Gambar 4.6, maka pada temperatur maksimum( $300^\circ\text{C}$ ), panjang gelombang bragg *bare* FBG adalah 1553.056 nm.

#### 4.2.2 Pengujian Repeatability dari FBG

Repeatability FBG diuji dengan melakukan pengulangan pengukuran pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang bragg. Pengukuran temperatur dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali. Rentang pengukuran untuk uji repeatability adalah pada temperatur  $30 - 120^\circ\text{C}$ . Hasil pengukuran repeatability dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7. Hasil Uji Repeatability *Bare* FBG

Dari ketiga grafik pada Gambar 4.7, menunjukkan bahwa FBG stabil walaupun dilakukan pengukuran berulang pada kondisi lingkungan yang berbeda. Dari ketiga pengambilan data tersebut, diperoleh bahwa terdapat 3 data dengan standar deviasi 0.2 yaitu pada temperatur  $30^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  dan  $105^\circ\text{C}$ . Hasil perhitungan standar deviasi pada setiap temperatur ditunjukkan pada tabel 4.2.



Tabel 4. 2. Hasil Perhitungan Standar Deviasi

temperatur	$\lambda_B$ (nm)			Average(nm)	Standar Deviasi
	I	II	III		$\sigma$
30	1550.023	1550.055	1550.06	1550.046	0.020
35	1550.098	1550.115	1550.13	1550.114	0.016
40	1550.148	1550.17	1550.18	1550.166	0.016
45	1550.193	1550.22	1550.215	1550.209	0.014
50	1550.238	1550.25	1550.25	1550.246	0.007
55	1550.268	1550.285	1550.285	1550.279	0.010
60	1550.303	1550.325	1550.33	1550.319	0.014
65	1550.368	1550.38	1550.38	1550.376	0.007
70	1550.393	1550.43	1550.425	1550.416	0.020
75	1550.458	1550.46	1550.47	1550.463	0.006
80	1550.508	1550.52	1550.515	1550.514	0.006
85	1550.583	1550.59	1550.595	1550.589	0.006
90	1550.643	1550.66	1550.665	1550.656	0.012
95	1550.698	1550.715	1550.725	1550.713	0.014
100	1550.768	1550.78	1550.785	1550.778	0.009
105	1550.808	1550.845	1550.84	1550.831	0.020
110	1550.878	1550.89	1550.91	1550.893	0.016
115	1550.938	1550.95	1550.96	1550.949	0.011
120	1551.003	1551.01	1551.015	1551.009	0.006

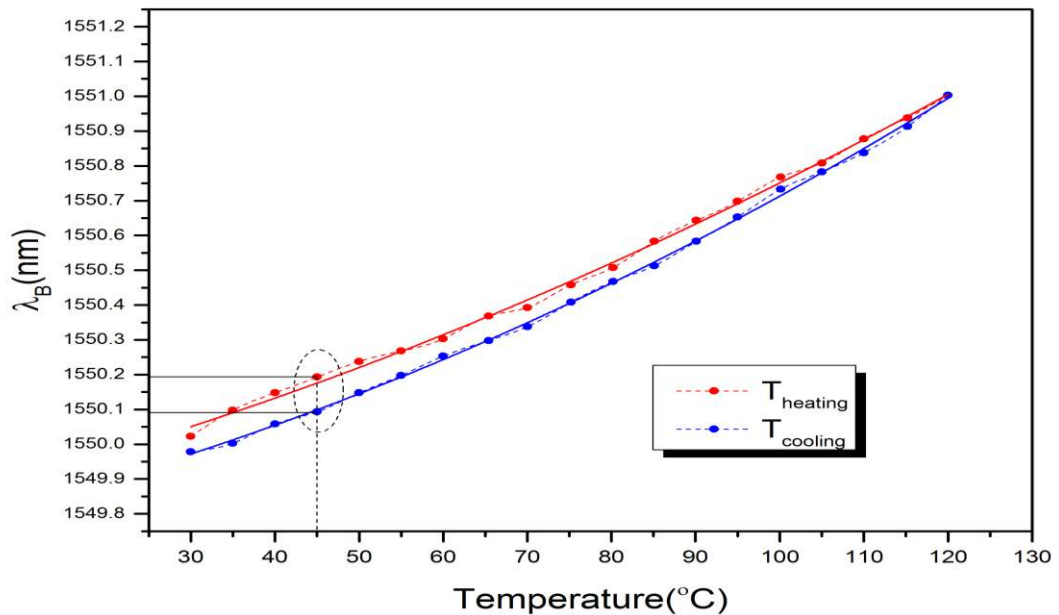
Perhitungan %repeatability dari FBG dengan menggunakan persamaan 4.4. Standar deviasi maksimumnya adalah 0.02, sedangkan rata-rata standar deviasi adalah 0,012. Jangkauan pengukuran maksimum dari tabel 4.1. yaitu 1551.015. maka repeatability dari FBG adalah

$$\begin{aligned}
 \%repeatability &= \frac{\text{std.Dev}_{\text{max}} - \text{rata-rata}_{\text{std.dev}}}{\text{Full Scale}} \times 100\% \\
 &= \frac{0.02 - 0.012}{1551.015} \times 100\% \\
 &= 0.001\%
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan standar deviasi dan uji repeatabiliti dapat ditunjukkan bahwa tingkat kepresisian data yang diperoleh adalah 0.001. Artinya adalah jika hasil pengukuran FBG menunjukkan nilai 1551.015, maka apabila pengukuran dilakukan berulang-ulang maka pembacaan akan berkisar 1551.013 - 1551.016 nm. Dari data yang diperoleh dan analisis perhitungan bahwa FBG menunjukkan kestabilan dan repeatabiliti yang baik terhadap pengaruh temperatur.

### 4.2.3 Pengujian Hysteresis dari FBG

Pengujian hysteresis dari FBG dilakukan dengan mengukur pergeseran panjang gelombang pada saat pemanasan (*heating*) dan pendinginan (*cooling*). Pengujian hysteresis diperlukan untuk mengetahui kepresisian FBG terhadap respon temperatur ketika temperatur dinaikkan dan diturunkan. *Range* pengukuran temperatur untuk uji hysteresis berkisar antara 30–120 °C. Akuisisi data pergeseran nilai  $\lambda_B$  dilakukan setiap kenaikan  $\sim 5$  °C. Hasil pengujian hysteresis diperlihatkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8. Hasil Uji Hysteresis *Bare* FBG

Perhitungan nilai hysteresis dengan menggunakan persamaan 4.3. contoh perhitungan nilai hysteresis adalah sebagai berikut

- Berdasarkan hasil pengamatan, pada temperatur 40°C diperoleh  $\lambda_{B\text{heating}} = 1550.148$  nm dan  $\lambda_{B\text{cooling}} = 1550.058$  nm.
- $True_{output}$  pada temperatur 40°C yaitu 1550.136 nm, dan  $Y_{FSO} = 1551.003$  nm.

Dari data tersebut, maka dapat diperoleh nilai  $\%FSO_{\text{naik}}$  dan  $\%FSO_{\text{turun}}$ .

$$\%FSO = \frac{True_{output} - Actual_{Output}}{Y_{FSO}}$$

$$\%FSO_{\text{naik}} = -0.00077$$

$$\%FSO_{\text{turun}} = 0.00503$$

Maka %hysteresis yang diperoleh pada temperatur 40°C yaitu 0.00580 %FSO. Berdasarkan analisis perhitungan, pada temperatur 45 °C diperoleh nilai hysteresis terbesar dengan %FSO sebesar 0.0645. Hasil perhitungan %hysteresis untuk keseluruhan data ditampilkan pada tabel pada lampiran C.

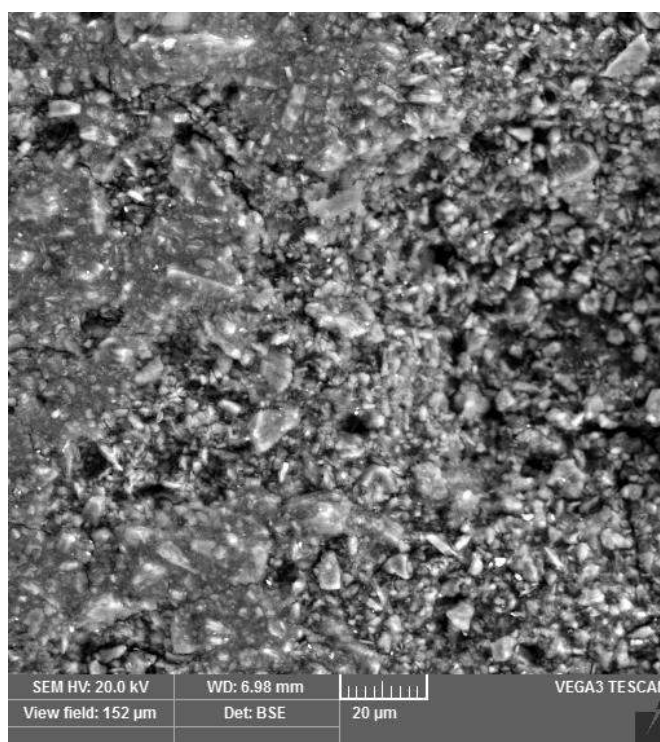
#### 4.3. Hasil Perancangan Sistem Sensor Keramik

Probe sensor keramik dibuat dengan menggunakan dua jenis keramik. Keramik pertama adalah keramik komersil berbahan dasar *mullite*. Keramik *mullite* memiliki CTE (*Coefficient Thermal Expansion*) sebesar 5.70-6.30  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$  berdiameter 17 mm dan berbahan dasar alumina silicate dengan presentasi kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 69% dan  $\text{SiO}_2$  sebesar 29%. Keramik dari bahan *mullite* mampu bertahan sampai pada temperatur 1350°C. Dengan karakteristik tersebut maka keramik *mullite* dapat digunakan sebagai bahan enkapsulator FBG.

Keramik jenis yang kedua adalah keramik berbahan dasar metakaolin yang difabrikasi di Laboratorium Fisika Material Universitas Negeri Makassar. Keramik berbahan dasar metakaolin dilakukan pengujian SEM-EDS untuk mendapatkan struktur mikroskopik dan kandungan kimia dari keramik geopolimer dan pengujian Thermomechanical Analyzer (TMA) untuk mendapatkan nilai *Coefficient Thermal Expansion*(CTE).

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang disintesis bahan dasar mineral aluminasilikat dan didefinisikan secara umum sebagai polimer yang atom-atomnya tidak tersusun atas rantai atom karbon dan terhubung antara yang satu dengan yang lainnya melalui ikatan kovalen. Geopolimer diproduksi dari reaksi polimerik larutan alkali dengan oksida silika dan aluminium, dicuring pada temperatur rendah  $< 100^\circ\text{C}$  dalam keadaan tertutup agar air reaksi tidak menguap(subaer 2007b).

Pengujian *Scanning Electron Microscopy*(SEM) dilakukan di laboratorium mikrostruktur Jurusan Fisika Universitas Negeri Makassar. Hasil uji SEM diperlihatkan pada Gambar 4.9. Karakterisasi dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk menyelidiki morfologi permukaan sampel. Morfologi permukaan keramik geopolimer menunjukkan homogenitas matriks yang baik.



Spectrum: test

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	39.77	46.41	59.57		0.00	15.85
Silicon	17.96	20.96	15.32	SiO2	44.84	2.45
Aluminium	17.23	20.11	15.31	Al2O3	38.01	2.62
Sodium	8.19	9.56	8.54	Na2O	12.88	1.78
Titanium	0.20	0.23	0.10	TiO2	0.39	0.14
Iron	1.70	1.99	0.73	FeO	2.56	0.35
Potassium	0.33	0.39	0.21	K2O	0.47	0.15
Sulfur	0.29	0.34	0.22	SO3	0.86	0.15
Total:	85.68	100.00	100.00			

Gambar 4. 9. Hasil Pengujian SEM-EDS Keramik Geopolimer Berbahan Dasar Metakaolin

Keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin memiliki kandungan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sebesar 38.01% dan silika ( $\text{SiO}_2$ ) sebesar 44.84%. Hasil tersebut ditunjukkan dari hasil pengujian SEM-EDAX dari keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin pada Gambar 4.9.

Keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin yang diaktivasi dengan larutan alkali  $\text{NaOH} + \text{NaO} \cdot 3\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Pasta geopolimer kemudian dicetak dan dicuring pada temperatur  $70^\circ\text{C}$  selama 1 jam. Desain cetakan keramik geopolimer dibuat dari bahan akrilik tabung dengan model dan hasil keramik tube geopolimer seperti pada Gambar 4.10.



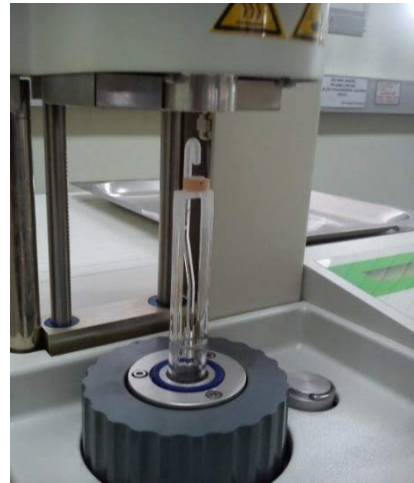
(a)



(b)

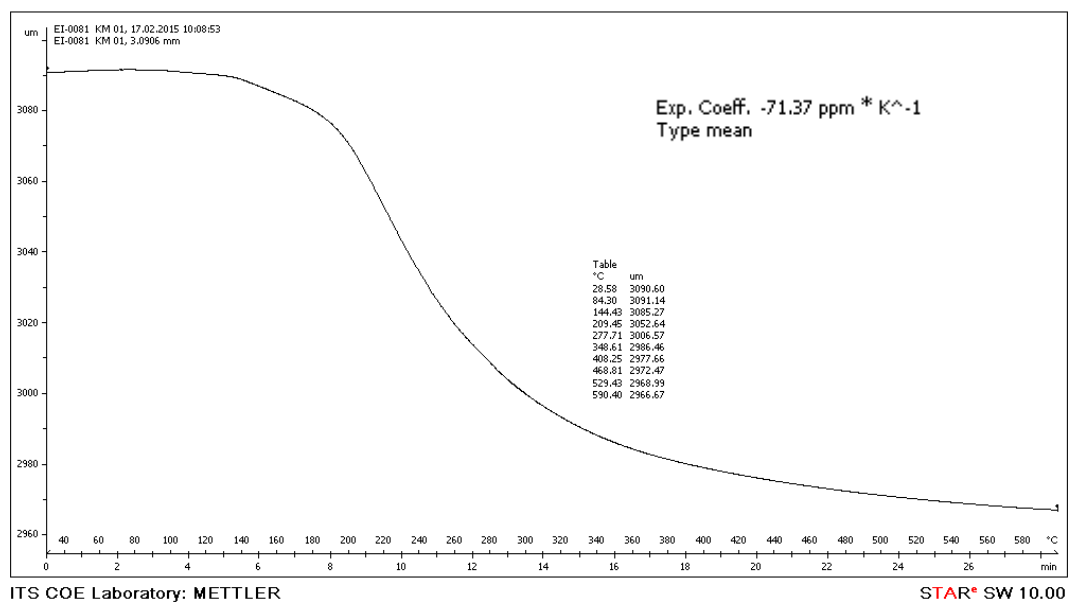
Gambar 4. 10.(a) Model cetakan pasta geopolimer, (b) *Ceramic Tube* geopolimer

Keramik geopolimer yang akan diaplikasikan sebagai enkapsulator dari FBG harus memiliki ketahanan dan kestabilan terhadap temperatur tinggi. Oleh karena itu dilakukan pengujian ekspansi termal bahan keramik. Pengujian ekspansi thermal bahan dengan menggunakan *Thermo Mechanical Analysis (TMA)*. Pengujian dilaksanakan di laboratorium Energy ITS dengan sampel berbentuk silindrik dan dengan diameter dan tinggi yang sama yaitu 5 mm. Proses pengukuran ekspansi thermal dengan menggunakan TMA seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11.(a) Mettler Thermomechanical Analyser (TMASDTA840)-1 di Lab. Energi ITS, (b) Proses Pengukuran Koefisien Ekspansi Thermal Keramik Geopolimer

Pengukuran ekspansi termal dilakukan dari temperatur  $30^{\circ}\text{C}$  hingga  $600^{\circ}\text{C}$  dengan laju pemanasan  $20^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ . Hasil pengujian TMA keramik geopolimer dapat dilihat dari grafik pada gambar 4.12.



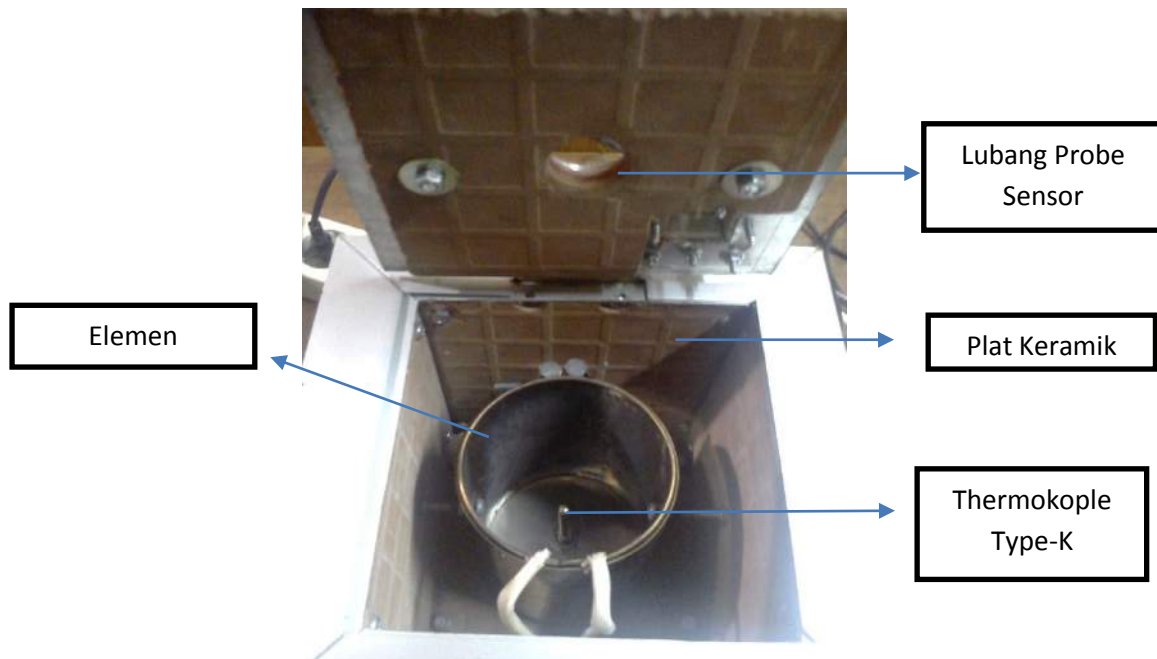
Gambar 4. 12.Hasil Pengujian TMA Keramik Geopolimer KM-01

Kurva tersebut menunjukkan bahwa terjadi ekspansi thermal pada keramik yang dipanaskan sampai pada temperatur 600°C. Perubahan dimensi dari keramik dapat terlihat bahwa terjadi penyusutan dimensi dimana pada sampel KM-1. Dimensi awalnya yaitu 3090,60 µm sebelum pengujian. Pada temperatur 160°C, keramik tetap stabil namun pada temperatur 200-300°C, keramik mengalami penyusutan dan kemudian akan kembali stabil sampai pada batas pengujian yaitu pada temperatur 600°C. Setelah pengujian sampel mengalami perubahan dimensi sebesar 0.123 mm.

Geopolimer tetap stabil secara dimensional merupakan indikasi dari rentang temperatur kerja geopolimer yang cukup tinggi walaupun mengalami penyusutan sebesar 4%. Penyusutan tersebut juga didapatkan pada pengujian Dylatometri keramik metakaolin yang menunjukkan penyusutan yang serupa (Hanen Douiri et al. 2014). Penyusutan tersebut dikarenakan adanya penguapan kandungan H<sub>2</sub>O (*bulk water*) yang terperangkap dalam matriks geopolimer (Carsten Kuenzel et al. 2012).

Hasil pengukuran TMA menunjukkan perubahan koefisien ekspansi keramik geopolimer dari 30°C hingga 590°C yang mencapai nilai -71,37 ppm K<sup>-1</sup> seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pengujian TMA telah menunjukkan bahwa keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin cocok digunakan sebagai keramik tube untuk perancangan enkapsulator probe sensor FBG

Sistem sensor yang dimaksud dalam penelitian adalah integrasi antara FBG dan probe keramik. Pada proses pengukuran, sistem sensor akan ditempatkan pada sistem pemanas (furnace) yang dirancang khusus untuk penelitian ini. Furnace yang dirancang terdiri dari dua bagian yaitu *chamber* pemanas dan *Thermocontroller*. *Thermocontroller* yang digunakan adalah thermocontroller Autonic Type TCN4NS. *Thermocontroller* digunakan untuk mengontrol temperatur dalam *chamber*. *Chamber* yang dirancang terdiri dari element pemanas dalam bentuk *stript heater* berbentuk tabung dengan sisi bagian atas tabung dibiarkan terbuka. Diameter tabung pemanas adalah 12 cm dan tinggi tabung pemanas 15 cm, dan daya yang digunakan sebesar 850 watt.

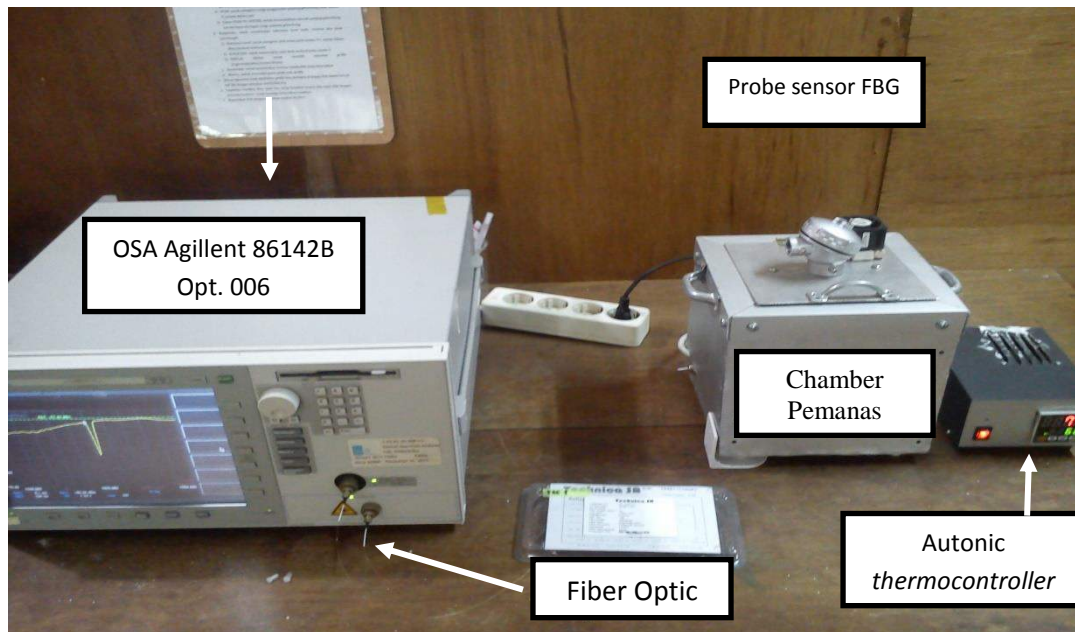


Gambar 4. 13.Desain Chamber Furnace Sistem Pengukuran

*Thermocontroller* mengontrol temperatur dalam sistem dengan menggunakan thermocouple type K yang terpasang pada *chamber*. Sebelum melakukan pengukuran, preparasi Probe sensor diawali dengan pemasangan FBG ke dalam keramik enkapsulator. Dengan kemampuan FBG untuk dapat ditekukkan di dalam probe sehingga dapat dilakukan pengukuran pergeseran panjang gelombang bragg dengan memanfaatkan spektrum transmisi dari FBG. Metode ini yang membedakan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh reddy et al yang menggunakan spektrum refleksi dari FBG sebagai basis pergeseran panjang gelombang bragg (Venkata Reddy Mamidi et al. 2014b)

Probe sensor yang telah terpasang FBG dimasukkan ke dalam chamber melalui celah chamber seperti pada Gambar 4.13. Kedua ujung FBG kemudian dihubungkan dengan source internal wavelength calibrator dan connector yang lainnya dihubungkan dengan input pada OSA. *Set-up* pengukuran probe sensor FBG dapat dilihat pada Gambar 4.14.





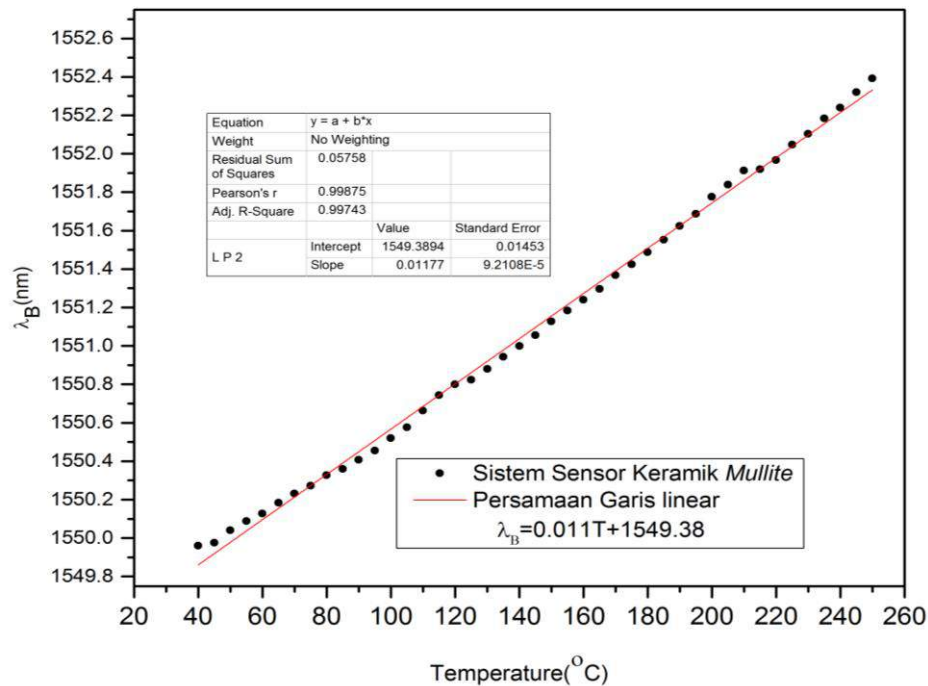
Gambar 4. 14.Set-up Pengukuran Sistem Sensor Sensor FBG

Untuk mengetahui karakteristik dari probe sensor maka dilakukanlah beberapa pengujian terhadap sistem sensor yaitu linearitas, hysteresis, repeatability, *range* pengukuran dan sensitivitas. Berikut adalah hasil dari pengujian karakteristik sensor dari kedua sistem sensor yang dibuat.

#### 4.4. Karakteristik Sistem Sensor Keramik *Mullite*

##### 4.4.1. Hasil Uji Linearitas Sistem Sensor

Pengujian Linearitas menjadi hal yang sangat penting dalam perancangan sistem sensor temperatur tinggi. Hal ini untuk menunjukkan bagaimana respon FBG dalam bentuk pergeseran panjang gelombang bragg ( $\lambda_B$ ) akibat perubahan temperatur. Rentang pengukuran untuk uji linearitas adalah 40-250°C dengan akuisisi data pada setiap kenaikan 5°C. Sebagai kalibrator digunakan thermokople tipe-K yang langsung terhubung ke *thermocontroller*. Berikut adalah grafik hasil pengujian linearitas sistem sensor sensor keramik *mullite*.



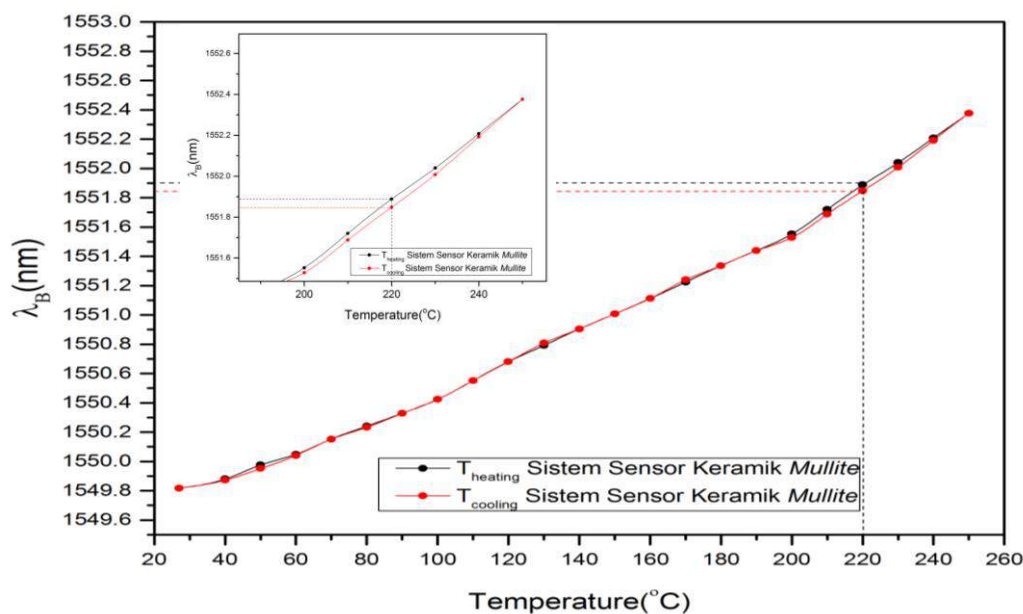
Gambar 4. 15. Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Pada Sistem Sensor Berbahan Keramik *Mullite*

Pada grafik tersebut, didapatkan nilai sensitivitas pada sistem sensor berbahan keramik *Mullite* yaitu  $11.77 \pm 0.09$  pm/°C. Persamaan garis linear dari grafik pada Gambar 4.15, yaitu  $\lambda_B = 0.011T + 1549.38$ . Dengan menggunakan panjang gelombang maksimum pada FBG yaitu 1553.056 nm. Maka diperoleh jangkauan pengukuran pada sistem sensor keramik *Mullite* adalah 320°C. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa metode enkapsulasi berhasil meningkatkan jangkauan pengukuran dari sensor FBG.

#### 4.4.2. Hasil Uji Hysteresis Sistem Sensor Keramik *Mullite*

Uji hysteresis merupakan suatu pengujian pada sensor untuk melihat kekonsistenan hasil pengukuran pada saat temperatur dinaikkan dan diturunkan. Akuisisi data pada uji hysteresis dilakukan untuk setiap kenaikan  $\sim 10^\circ\text{C}$ . Perhitungan nilai hysteresis untuk setiap temperatur yang terukur dengan menggunakan persamaan 4.3. Pada sistem sensor keramik *Mullite* diperoleh maximum hysteresis pada temperatur 220°C sebesar 0.0025% FSO. Data hasil pengujian dan perhitungan nilai %Hysteresis untuk sistem sensor kermik *Mullite*

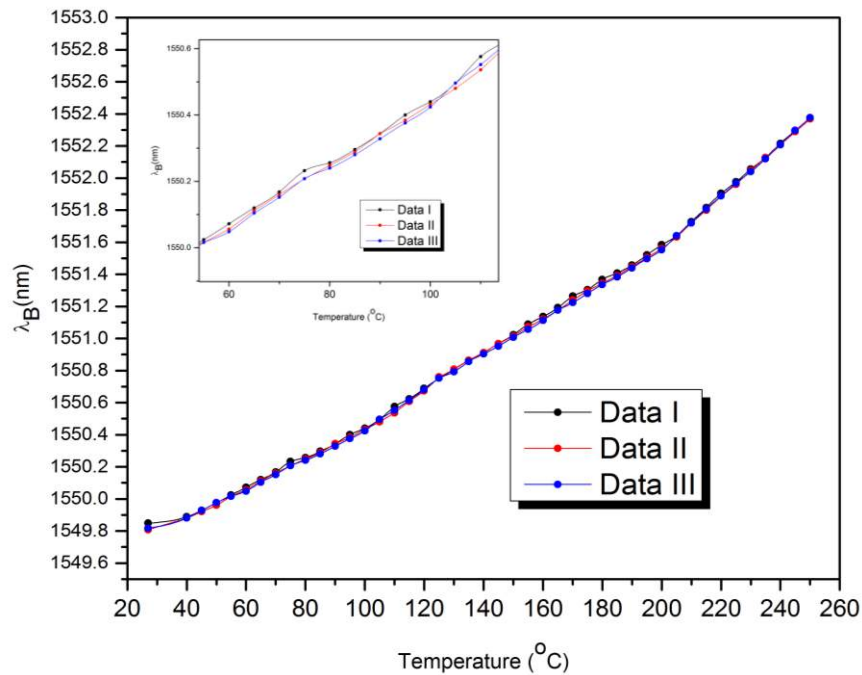
disajikan pada Lampiran E. Gambar 4.16 adalah grafik hasil uji hysteresis sistem sensor keramik *Mullite*.



Gambar 4. 16.Hasil Uji Hysteresis Sistem Sensor Keramik *Mullite*

#### 4.4.3. Repeatability Sistem Sensor Keramik *Mullite*

Uji repeatability sistem sensor dilakukan dengan melakukan pengulangan pengukuran pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang bragg pada sistem sensor. Pengulangan pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengukuran. Rentang pengukuran untuk uji repeatability adalah pada temperatur 27-250°C. Akuisisi data pergeseran panjang gelombang bragg setiap kenaikan 5°C. Hasil pengukuran untuk uji repeatability pada sistem sensor diperlihatkan pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.17. diperoleh kepresisian yang tinggi dari ketiga data yang diperoleh. Hasil ini juga dapat dilihat apabila dilakukan perhitungan standar deviasi terhadap ketiga data yang diperoleh.



Gambar 4. 17.Hasil Uji Repeatability Sistem Sensor Keramik *Mullite*

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.17, uji repeatability menunjukkan kepresisian yang baik pada ketiga grafik. Dengan melakukan analisis perhitungan nilai standar deviasi untuk setiap temperatur yang terukur pada sistem sensor keramik *Mullite*, maka diperoleh nilai standar deviasi 0.021 pada temperatur 27°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada temperatur 27°C, diperoleh data yang paling tidak presisi dari seluruh data hasil pengukuran. Hasil perhitungan nilai standar deviasi pada sistem sensor keramik *Mullite* ditunjukkan pada lampiran D.

Dengan menggunakan hasil perhitungan nilai standar deviasi untuk setiap probe sensor, maka %repeatability dapat diperoleh. Perhitungan %Repeatability dari probe sensor dengan menggunakan persamaan 4.4.

Pada sistem sensor keramik *Mullite*, standar deviasi maksimumnya adalah 0.021, sedangkan rata-rata standar deviasi adalah 0,009. Jangkauan pengukuran

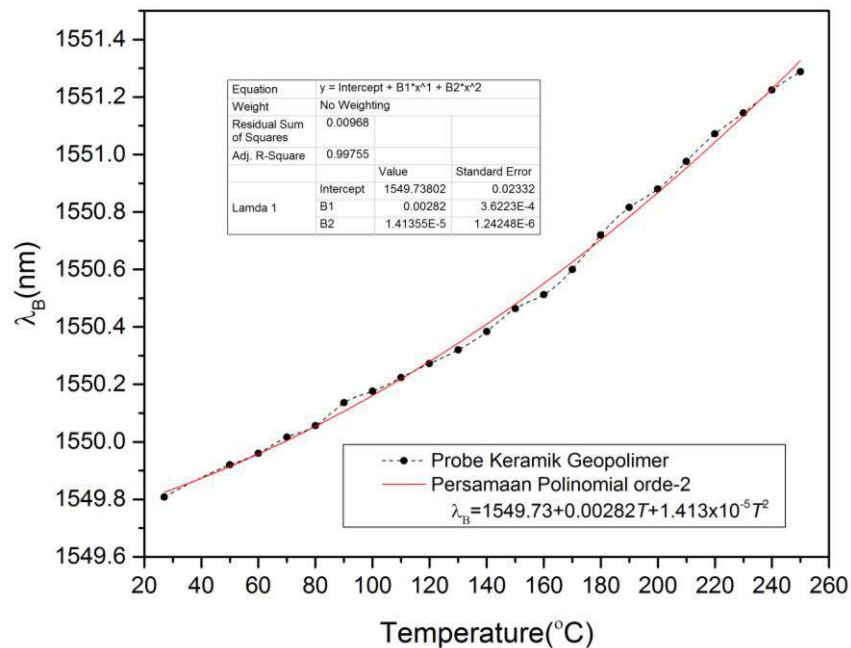
maksimum yaitu 1552.376. maka Repeatability dari probe sensor keramik tertutup adalah

$$\begin{aligned}\% \text{Repeatability} &= \frac{\text{std.Dev}_{\text{max}} - \text{rata-rata}_{\text{std.dev}}}{\text{Full Scale}} \times 100\% \\ &= \frac{0.021 - 0.009}{1552.376} \times 100\% \\ &= 0.0007\%\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik sistem sensor keramik *Mullite*, diperoleh karaktersistik sensor yang stabil, presisi dan Repeatability yang tinggi.

#### 4.5. Karakteristik Sistem Sensor Keramik Geopolimer

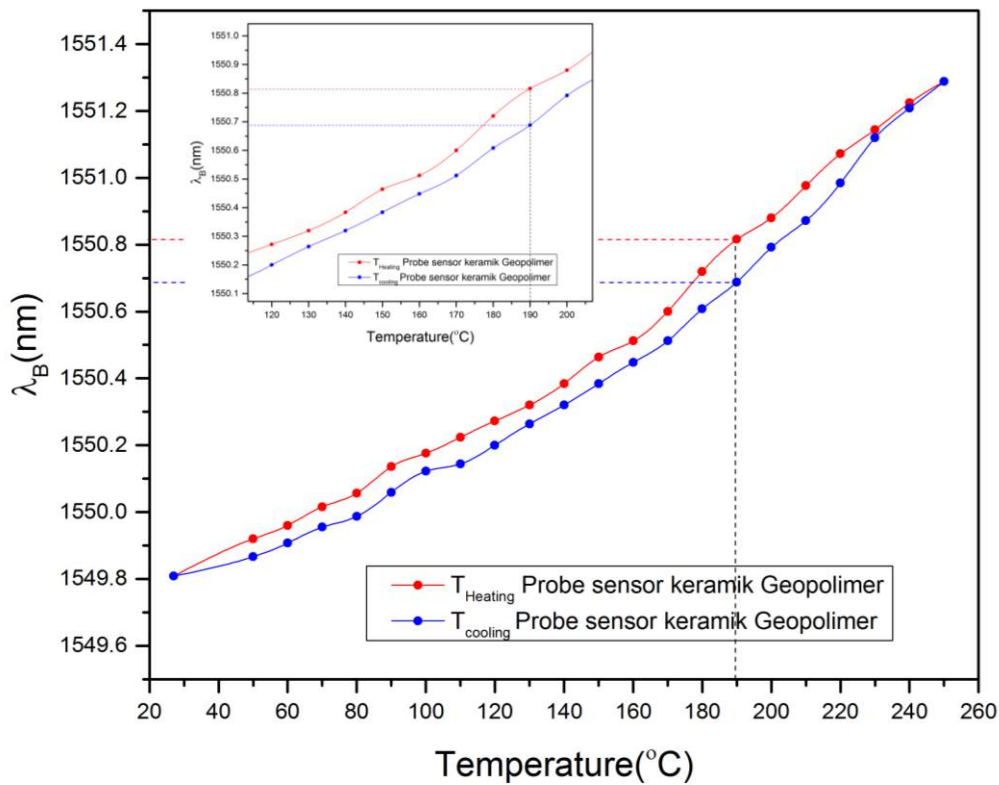
Pengujian dilakukan seperti yang telah dilakukan untuk sistem sensor FBG dari bahan keramik *Mullite*. Pengujian ini dimaksudkan untuk menunjukkan karakteristik dari rancangan sensor untuk pengujuran temperatur tinggi. Pengujian pertama untuk mengetahui pergeseran panjang gelombang bragg FBG terhadap pengaruh kenaikan temperatur dari 27-250°C dengan pengukuran setiap kenaikan 10°C. Apabila ditinjau terhadap hasil pengujian koefisien muai thermal pada keramik geopolimer yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan dikaitkan dengan rentang pengukuran yang dilakukan, maka pada rentang tersebut masih dalam rentang dimana keramik geopolimer dalam proses ekspansi akibat pengaruh temperatur. Hal ini menunjukkan pada daerah tersebut keramik geopolimer masih dalam rentang *thermoelastic* dari bahan sehingga kemampuan untuk kembali ke keadaan awal setelah mengalami pemanasan masih tinggi. Hasil pengujian karakteristik sistem sensor dari keramik geopolimer dapat diperlihatkan oleh grafik pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18. Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Pada Probe Sensor Fbg Dari Keramik Geopolimer Berbahan Metakaolin

Pergeseran panjang gelombang bragg pada sensor FBG dapat dilihat pada bentuk kurva pada Gambar 4.18. Model kurva di dekati dengan persamaan kuadrat yaitu  $\lambda_B = 1549.73 + 0.00282T + 1.414 \times 10^{-5} T^2$ . Sehingga dengan menggunakan panjang gelombang bragg maximum pada FBG pada temperatur 300°C yaitu 1553.056 nm, maka jangkauan pengukuran dengan menggunakan sistem sensor keramik geopolimer berbahan dasar metakaolin. Jangkauan pengukuran probe sensor sebesar adalah 27-386°C.

Hysteresis hasil pengujian pergeseran panjang gelombang bragg sistem sensor FBG diperlukan untuk melihat respon sensor terhadap kenaikan dan penurunan temperatur. Pengukuran hysteresis dengan mengukur pergeseran panjang gelombang bragg pada temperatur 27-250°C. Akuisisi data pergeseran nilai  $\lambda_B$  setiap kenaikan dan penurunan 10°C. Diperoleh grafik pergeseran panjang gelombang pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 19. Grafik Kurva Hysteresis Probe sensor FBG Keramik Geopolimer

Perhitungan nilai hysteresis dengan menggunakan persamaan 4.3. contoh perhitungan nilai hysteresis adalah sebagai berikut

- Berdasarkan hasil pengamatan, pada temperatur 140°C diperoleh  $\lambda_{B\text{heating}} = 1550.464 \text{ nm}$  dan  $\lambda_{B\text{cooling}} = 1550.384 \text{ nm}$ .
- $True_{output}$  pada temperatur 140°C yaitu 1550.599 nm, dan  $Y_{FSO} = 1551.288 \text{ nm}$ .

Dari data tersebut, maka dapat diperoleh nilai %FSO<sub>naik</sub> dan %FSO<sub>turun</sub>.

$$\%FSO = \frac{True_{output} - Actual_{output}}{Y_{FSO}}$$

$$\%FSO_{naik} = 0.00870$$

$$\%FSO_{turun} = 0.01386$$

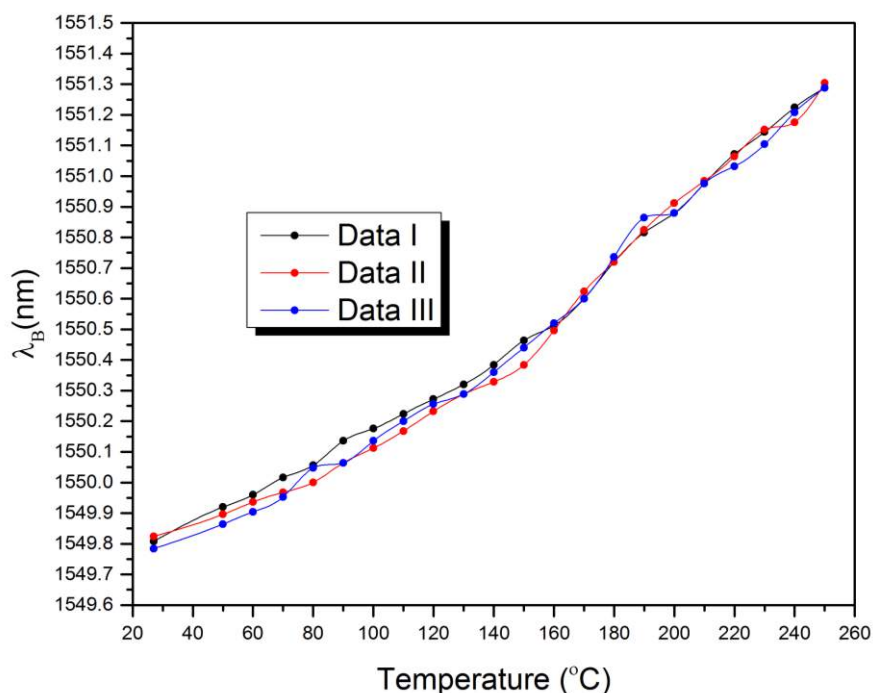
Maka %hysteresis yang diperoleh pada temperatur 150°C yaitu 0.00515 %FSO. Berdasarkan analisis perhitungan untuk keseluruhan data kenaikan dan penurunan temperatur pada sistem sensor keramik geopolimer, pada temperatur 190 °C diperoleh nilai hysteresis terbesar dengan %FSO sebesar 0.00825%. Hasil

perhitungan %hysteresis untuk keseluruhan data ditampilkan pada tabel pada lampiran E.

Untuk mengetahui kepresisian dari sensor FBG maka dilakukan pengujian repeatability dari sistem sensor keramik geoolimer. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali dan akuisisi data pergeseran panjang gelombang bragg setiap kenaikan 10°C. Hasil uji Repeatability sistem sensor disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.20. Untuk mendapatkan nilai %Repeatability dari sistem sensor keramik geopolimer, maka harus dilakukan perhitungan nilai standar deviasi dari data hasil pengujian repeatibiliti pada Gambar 4.20.

Berdasarkan hasil perhitungan nilai standar deviasi (Lampiran F) untuk sistem sensor keramik geopolimer, diperoleh nilai standar deviasi maksimumnya adalah 0.042, sedangkan rata-rata standar deviasi adalah 0,023. Jangkauan pengukuran maksimum yaitu 1551.304. maka repeatability dari sistem sensor keramik geopolimer adalah

$$\begin{aligned}\% \text{Repeatability} &= \frac{\text{std.Dev}_{\text{max}} - \text{rata-rata}_{\text{std.dev}}}{\text{Full Scale}} \times 100\% \\ &= \frac{0.042 - 0.023}{1551.304} \times 100\% \\ &= 0.001\%\end{aligned}$$



Gambar 4. 20.Hasil Uji Repeatability Probe Sensor FBG Keramik Geopolimer



Data hasil pengujian sensor temperatur berbasis FBG yang diperoleh dapat dievaluasi dengan cara menghitung nilai *range*, sensitivitas dan resolusi sensor. *Range* pergeseran panjang gelombang Bragg dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta = \lambda_{Bmax} - \lambda_{Bmin}$$

Dimana  $\lambda_{Bmax}$  dan  $\lambda_{Bmin}$  adalah panjang gelombang bragg maximum dan Minimum

Sensitivitas dapat dihitung dari rentang pergeseran panjang gelombang bragg dan temperatur dengan menggunakan persamaan:

$$S = \frac{\lambda_{Bmax} - \lambda_{Bmin}}{T_{max} - T_{min}}$$

dimana  $T_{max}$  dan  $T_{min}$  adalah Temperatur maksimum dan minimum.

Resolusi pengukuran merupakan nilai terkecil yang mampu dideteksi oleh suatu alat ukur. Resolusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$R = \frac{N}{S}$$

dimana  $N$  adalah skala terkecil yang dapat dideteksi oleh *Optical Spectrum Analyzer (OSA)* dan  $S$  adalah nilai sensitivitas. Nilai terkecil yang dapat dideteksi oleh *OSA* adalah 0,001 nm. Oleh karena itu, resolusi dari sensor temperatur berbasis FBG dapat dihitung.

Dengan menggunakan ketiga persamaan di atas, maka *Range*, Resolusi dan Sensitifitas dari *bare* FBG adalah

$$\Delta = 1551.003 \text{ nm} - 1550.023 \text{ nm}$$

$$\Delta = 0.98 \text{ nm}$$

*Range* (Full Scale Output) untuk *bare* FBG sebesar 0.98 nm

$$S = \frac{\lambda_{Bmax} - \lambda_{Bmin}}{T_{max} - T_{min}}$$

$$S = \frac{1551.003 \text{ nm} - 1550.023 \text{ nm}}{120^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}$$

$$S = \frac{0.98 \text{ nm}}{90^{\circ}\text{C}}$$

$$S = 0.010 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$$

Sensitifitas dari *bare* FBG adalah 0.010 nm/ $^{\circ}\text{C}$

$$R = \frac{N}{S}$$

$$R = \frac{0.001 \text{ nm}}{0.010 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}}$$

$$R = 0.1^{\circ}\text{C}$$

Dari menggunakan persamaan di atas maka nilai *Range*, sensitifitas dan resolusi untuk Probe sensor FBG yang terenkapsulasi *ceramic tube*. Hasilnya dapat disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut

Tabel 4. 3.Perbandingan nilai Range, sensitivitas dan Resolusi Sistem sensor

Variasi Model Probe	<i>Range</i> (nm)	Sensitivitas (nm/ $^{\circ}\text{C}$ )	Resolusi ( $^{\circ}\text{C}$ )
<i>Bare</i> FBG	0.98	0.010	0.1
Probe Sensor FBG Dari Keramik <i>Mullite</i>	2.528	0.011	0.08
Probe Sensor FBG Dari Keramik Geopolimer	1.48	0.006	0.15

Apabila dibandingkan antara *bare* FBG dengan metode enkapsulasi ternyata metode enkapsulasi menghasilkan sensitifitas dan resolusi yang lebih baik. Dibandingkan dengan sensitifitas sensor FBG dalam penelitian V.R. Mamidi et al, dimana probe sensor FBG dengan metode enkapsulasi dari bahan logam didapatkan sensitifitas 0.014 nm/ $^{\circ}\text{C}$ (Venkata Reddy Mamidi et al. 2014a). Hasil ini hampir sama dengan metode enkapsulasi dengan menggunakan keramik sebagai enkapsulator. Sensitifitas metode enkapsulasi pada Tabel 4.3, diperoleh hasil pengukuran yang sesuai dengan sensor FBG dengan metode *Chemical Composition Grating* (CCG) yang dikembangkan oleh Saidi Reddy et al(Parne

Saidi Reddy et al. 2010). Probe sensor FBG dengan menggunakan keramik tube namun dengan dari bahan zirconia diperoleh sensitifitas yang tidak berbeda jauh yaitu 0.028 nm/°C (Cherl-Hee Lee et al. 2011). Perbandingan hasil tersebut telah membuktikan keberhasilan dalam merancang probe sensor FBG dengan metode enkapsulasi dengan keramik.

Dengan meninjau grafik pergeseran panjang gelombang bragg akibat perubahan temperatur pada *Bare* FBG yang disajikan pada Gambar 4.6 dan pada sistem sensor yang disajikan pada Gambar 4.15, dan apabila dikaitkan pengaruh perubahan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang bragg pada FBG yang terdapat pada persamaan 2.18. Dimana perubahan temperatur mempengaruhi *Thermal Expansion Coefficient* (TEC) yang ditunjukkan oleh persamaan 2.19 dan *Thermo-Optic Coefficient* (TOC) yang ditunjukkan oleh persamaan 2.20. Pada Fiber optic dari bahan silika memiliki nilai TEC dan TOC masing-masing  $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  dan  $8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , namun pada penelitian ini yang menggunakan Fiber Optic dari bahan *Polymide* nilai kedua variabel tersebut tidak diketahui. Sehingga dengan meninjau persamaan garis linear pada setiap pengujian linearitas, maka gradien dari persamaan garis tersebut menunjukkan kedua variabel TEC dan TOC sebagai fungsi dari perubahan temperatur.

Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah bagaimana memperbesar jangkauan pengukuran input (Span) dari *bare* FBG dengan metode enkapsulasi dengan ceramic tube. Span pengukuran untuk kedua jenis probe dapat dihitung melalui persamaan kurva kuadratik dari kedua jenis probe sensor. Hasilnya dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4. 4. Perbandingan Jangkauan Pengukuran Sistem Sensor

No	Variasi Probe Sensor	Persamaan	Jangkauan Pengukuran
1	<i>Bare</i> FBG	$0.011T + 1549.6 = \lambda_B$ $aT + b = c$ $T = \frac{c - b}{a}$ <p>Dimana :  <math>a = 0.011</math>  <math>b = 1549.6</math></p>	300°C

		$c = 1553.056$	
2	Probe Keramik <i>Mullite</i>	$0.11T + 1549.38 = \lambda_B$ $aT + b = c$ $T = \frac{c - b}{a}$ <p>Dimana :</p> $a = 0.011$ $b = 1549.38$ $c = 1553.056$	320 °C
3	Probe Keramik Geopolimer	$1.414 \times 10^{-5} T^2 + 0.00282 T + 1549.73 = \lambda_B$ $aT^2 + bT + c = d$ $T = -\frac{b}{2a} \pm \left[ \frac{d - c}{a} + \frac{b^2}{4a} \right]^{1/2}$ <p>Dimana :</p> $a = 1.414 \times 10^{-5}$ $b = 0.00282$ $c = 1549.73$ $d = 1553.056$	386 °C

Span pengukuran berhasil ditingkatkan dengan metode enkapsulasi dengan keramik. Jangkauan pengukuran dari *bare* FBG yaitu 27-300°C mampu ditingkatkan menjadi 27-386°C dengan metode enkapsulator dengan keramik geopolimer. Namun apabila ditinjau dari karakteristik sensor, sistem sensor FBG dengan enkapsulator dari keramik *mullite* memiliki yaitu hysteresis, repeatability, dan sensitifitas yang lebih baik dari probe keramik geopolimer. Ditinjau dari persentase perbandingan kandungan alumina dan silika pada kedua jenis keramik sebagai bahan enkapsulator, diperoleh bahwa, keramik geopolimer dengan kandungan silika yang lebih besar memiliki Span pengukuran yang lebih besar dibandingkan dengan keramik *mullite* dengan kandungan silika yang lebih kecil.

Dengan hasil pengujian yang telah dipaparkan, maka telah berhasil dikembangkan sebuah sensor temperatur tinggi berbasis FBG yang memiliki karakteristik linearitas, repeatability dan hysteresis serta memiliki sensitifitas, resolusi dan *range* yang tinggi. Basis penelitian berbasis pergeseran panjang

gelombang bragg dengan memanfaatkan spektrum transmisi pada OSA menjadi keunggulan dalam penelitian ini karena dengan menggunakan metode yang sederhana, mampu menghasilkan karakteristik sensor yang baik.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan hasil pembahasan yang dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Fiber Bragg Grating (FBG) mampu mendeteksi perubahan temperatur melalui pergeseran Panjang Gelombang Bragg( $\lambda_B$ ). Sistem pengukuran dengan mengamati spektrum transmisi telah mampu dikembangkan dengan melakukan prosedur enkapsulasi dengan *ceramic tube* berbahan dasar aluminasilikat.
2. *Optical Spektrum Analyzer(OSA)* Agilent 86142B mampu mendeteksi panjang gelombang dan intensitas transmisi yang melalui fiber optik. Sumber cahaya yang digunakan yaitu *Internal Wavelength Calibrator*, telah mampu menunjukkan spektrum transmisi yang stabil sehingga proses pengamatan pergeseran *Panjang Gelombang Bragg* dapat teramati dengan baik pada OSA.
3. *Bare* FBG memiliki jangkauan pengukuran temperatur 27-300°C. Metode enkapsulasi dengan menggunakan keramik geopolimer telah mampu meningkatkan jangkauan pengukuran dari FBG yaitu 27-386°C. Sistem sensor yang merupakan integrasi antara probe sensor dan FBG memiliki sensitivitas dan resolusi masing-masing sebesar 0.011 nm/°C dan 0.08°C. sedangkan *bare* FBG dengan jangkauan pengukuran yang lebih pendek, memiliki sensitivitas dan resolusi masing-masing sebesar 0.010 nm/°C dan 0.1°C
4. Pengujian karakteristik sensor yang terdiri dari Uji Linearitas, repetibility dan hysteresis pada sistem sensor, telah menunjukkan karakteristik sistem sensor yang dirancang dengan metode enkapsulasi memiliki kestabilan, presisi, dan akurasi yang tinggi.

5. Metode enkapsulasi FBG sebagai sensor temperatur tinggi merupakan salah satu opsi yang tepat sebagai alat ukur temperatur tinggi berbasis fiber optik dengan keunggulan pada metode pengukuran.

## 5.2 Saran

Kepada pembaca yang hendak melakukan penelitian sejenis, disarankan beberapa hal berikut ini.

1. Diperlukan aksesoris penunjang pada *Optical Spectrum Analyzer (OSA)* seperti *circulator* atau *coupler* untuk mengamati spektrum refleksi dari FBG.
2. Metode enkapsulasi dengan menggunakan *ceramic tube* dapat dikembangkan dengan variasi jenis keramik atau keramik dengan perbandingan komposisi alumina dan silika yang berbeda.
3. Diperlukan sebuah sistem pemanas (*furnace*) dengan temperatur maksimum yang lebih besar sehingga pengujian dapat dilakukan dengan pengujian pada temperatur lebih tinggi.

## Daftar Pustaka

- Banerjee, Partha P., and Ting-Chung Poon. 1991. *Principles of Applied Optics*. USA: Richard D. Irwin, Inc., and Aksen Associates, Inc.,.
- Bentley, John. 2005. *Principle Of Measurement System*. England: Pearson Educational Limited.
- Brambilla, et al. 2010. "Bragg Grating Ternary SiO<sub>2</sub>; SnO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O Optical Glass Fibers." *Optic Letters*.
- Carsten Kuenzel, Luc J. Vandeperre, Shane Donatello, Aldo R. Boccaccini, and Chris Cheeseman. 2012. "Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in Metakaolin-Based Geopolymers." *The American Ceramic Society* 95: 3270–77.
- Cherl-Hee Lee, Jonghun Lee, Min-Kuk Kim, and Kwang Taek Kim. 2011. "Characteristics of a Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Using the Thermal Strain of an External Tube." *Journal of the Korean Physical Society* 59 (5): 3188–91.
- Crips, John. 2001. *Introduction to Fiber Optics*. 2nd ed. Newnes.
- Daud, S., M. A. Jalil, S. Najmee, Saktioto Saktioto, J. Ali, and P. P. Yupapin. 2011. "Development of FBG Sensing System for Outdoor Temperature Environment." *Procedia Engineering*, The 2nd International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2010 (I-SEEC 2010), 8: 386–92. doi:10.1016/j.proeng.2011.03.071.
- davidovits, Joseph. 1991. "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials." *Journal of Thermal Analysis*.
- . 1994. "Properties of Geopolymer Cements." *Alkaline Cements and Concretes, Kiev State Technical University, Ukraine*, 131–49.
- . n.d. "Mineral Polymers and Methods of Making Them."
- Douglas, M.C. 1999. *PROCESS/ INDUSTRIAL INSTRUMENTS AND CONTROLS HANDBOOK*. Los Angeles: MC Graw Hill International.
- Fraden, Jacob. 2004. *Handbook Of Modern Sensors: Physics, Design, and Applications*. 3rd ed. USA: Springer-Verlag.
- Granizo, M. L., M. T. Blanco-Varela, and A. Palomo. 2000. "Influence of the Starting Kaolin on Alkali-Activated Materials Based on Metakaolin. Study of the Reaction Parameters by Isothermal Conduction Calorimetry." *Journal of Materials Science* 35 (24): 6309–15. doi:10.1023/A:1026790924882.
- Grattan, and Meggit. 2000a. *Optical Fiber Sensor Technology*. City University of London.
- Hanen Douiri, Soumaya Louati, Samir Baklouti, and Zouhir Fakhfakh. 2014. "Structural, Thermal and Dielectric Properties of Phosphoric Acid-Based Geopolymers with Different Amounts of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>." *Materials Letters* 116 (February).
- Hatta, Agus, Yuliya Semenova, Ginu Rajan, Pengfei Wang, J. Zheng, and Gerald Farrell. 2009. "Analysis of Temperature Dependence for a Ratiometric Wavelength Measurement System Using SMS Fiber Structure Based Edged Filters." *Articles*, January. <http://arrow.dit.ie/engscheceart/72>.



- Hui, Rongqing, and Maurice O'sullivan. 2009. *Fiber Optic Measurement Technique*. USA: Elsevier Academic Press.
- Kashyap, Raman. 2010a. *Fiber Bragg Gratings*. elsevier academic press.
- Li, X, P.K Venuvinod, A Djorjevich, and Z Liu. 2001. "Predicting Machining, Errors in Turning Using Hybrid Learning." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 18: 863–72.
- Manuel Silva-López, Amanda Fender, William N. MacPherson, James S. Barton, and Julian D. C. Jones. 2005. "Strain and Temperature Sensitivity of a Single-Mode Polymer Optical Fiber." *OPTICS LETTERS* 30 (23).
- Noritomo Hirayama, and Yasukazu Sano. 2000. "Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Practical Use." *ISA Transactions* 39: 169–73.
- Palomo, A., M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, and M. W. Grutzeck. 1999. "Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin." *Cement and Concrete Research* 29 (7): 997–1004. doi:10.1016/S0008-8846(99)00074-5.
- Parne Saidi Reddy, Ravinuthala L.N., Kamineni S. Narayana, Madhuvaras S, and Dipankar Sen Gupta. 2010. "A Novel Method for High Temperature Measurements Using Fiber Bragg Grating Sensor." *Optica Applicata XL* (3).
- Purwowibowo. 2008. "Peningkatan Akurasi Linear Transducer Menggunakan Genetic Algorithm Dan Golden Ratio Segmentation." Jakarta: Universitas Indonesia.
- Reddy et al. 2012. "Method for Enhancing and Controlling Temperature Sensitivity of Fiber Bragg Grating Sensor Based on Two Bimetallic Strips." *IEEE Photonics Journal*.
- Shiue, Sham-Tsong, Hung-Chien Lin, Ting-Ying Shen, and Hsiang-Chun Hseuh. 2006. "Humidity and Temperature-Dependence of the Interfacial Shear Strength between the Glass Fiber and Primary Coating in Double-Coated Optical Fibers." *Materials Science and Engineering: A* 434 (1–2): 202–6. doi:10.1016/j.msea.2006.06.108.
- Subaer. 2007a. *Pengantar Fisika Geopolimer*. Jakarta: Dirjen Dikti Depdiknas.
- Sulaeman, Cecep, and Kusnadi. 2011. "Kalibrasi Temperatur Pada PT100 Dan Thermocouple." *JURNAL ILMIAH ELITE ELEKTRO* 02.
- Venkata Reddy Mamidi, Srimannarayana Kamineni, L.N. Sai Prasad Ravinuthala, Sai Shankar Madhuvarasu, Venkatappa Rao Thumu, Vengal Rao Pachava, and Kishore Putha. 2014a. "Characterization of Encapsulating Materials for Fiber Bragg Grating-Based Temperature Sensors." *Fiber and Integrated Optics* 33: 325–35.
- . 2014b. "Fiber Bragg Grating-Based High Temperature Sensor and Its Low Cost Interrogation System with Enhanced Resolution." *Optica Applicata*, 2, XLIV.
- Wang, wenhua, xinsheng jiang, and Qingxu Yu. n.d. "Temperature Self-Compensation Fiber-Optic Pressure Sensor Based on Fiber Bragg Grating and Fabry–Perot Interference Multiplexing."
- Zhan, Yage, Shaolin Xue, Qinyu Yang, Shiqing Xiang, Hong He, and Rude Zhu. 2008a. "A Novel Fiber Bragg Grating High-Temperature Sensor." *Optik* -

## LAMPIRAN A

Tabel 1 Data Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Pergeseran Panjang Gelombang Bragg Dan Intensitas Transmisi FBG

No	Temperatur (°C)	$\lambda_B$ (nm)	Intensitas Transmisi (dBm)	No	Temperatur (°C)	$\lambda_B$ (nm)	Intensitas Transmisi (dBm)
1	27	1549.856	-75.553	23	145	1550.608	-74.597
2	40	1549.872	-71.771	24	150	1550.648	-73.633
3	45	1549.912	-70.089	25	155	1550.72	-72.671
4	50	1549.936	-69.621	26	160	1550.8	-72.766
5	55	1549.976	-69.628	27	165	1550.8	-71.255
6	60	1550	-69.883	28	170	1550.856	-71.954
7	65	1550.024	-70.594	29	175	1550.904	-73.131
8	70	1550.072	-70.768	30	180	1550.968	-73.148
9	75	1550.12	-71.347	31	185	1551	-72.738
10	80	1550.16	-71.321	32	190	1551.072	-75.76
11	85	1550.184	-71.451	33	195	1551.104	-75.44
12	90	1550.216	-71.017	34	200	1551.152	-74.994
13	95	1550.256	-71.661	35	205	1551.208	-73.495
14	100	1550.272	-72.425	36	210	1551.248	-72.524
15	105	1550.32	-73.119	37	215	1551.304	-75.237
16	110	1550.32	-72.202	38	220	1551.344	-73.908
17	115	1550.36	-74.087	39	225	1551.384	-73.003
18	120	1550.392	-75.039	40	230	1551.424	-72.459
19	125	1550.44	-74.901	41	235	1551.48	-69.544
20	130	1550.48	-75.314	42	240	1551.544	-67.017
21	135	1550.528	-76.547	43	245	1551.622	-67.133
22	140	1550.544	-74.238	44	250	1551.71	-67.573

## LAMPIRAN B

Tabel 2.Data Pengaruh kenaikan temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg bare FBG

No	Temperatur(°C)	Intensitas Transmisi(dBm)
1	55	1550.268
2	60	1550.303
3	65	1550.368
4	70	1550.393
5	75	1550.458
6	80	1550.508
7	85	1550.583
8	90	1550.643
9	95	1550.698
10	100	1550.768
11	105	1550.808
12	110	1550.878
13	115	1550.938
14	120	1551.003

## Lampiran C

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan Uji Hysteresis bare FBG

Temperature (oC)	True Output (nm)	$\lambda_B$ (nm)		%FSO		%histeresis
		heating	cooling	heating	cooling	(%heat- %cool)
30	1550.027	1550.023	1549.978	0.000258	0.003159	-0.00290
35	1550.0815	1550.098	1550.003	-0.00106	0.005061	0.00613
40	1550.136	1550.148	1550.058	-0.00077	0.005029	0.00580
45	1550.1905	1550.193	1550.093	-0.00016	0.006286	0.00645
50	1550.245	1550.238	1550.148	0.000451	0.006254	0.00580
55	1550.2995	1550.268	1550.198	0.002031	0.006544	0.00451
60	1550.354	1550.303	1550.253	0.003288	0.006512	0.00322
65	1550.4085	1550.368	1550.298	0.002611	0.007124	0.00451
70	1550.463	1550.393	1550.338	0.004513	0.008059	0.00355
75	1550.5175	1550.458	1550.408	0.003836	0.00706	0.00322
80	1550.572	1550.508	1550.468	0.004126	0.006705	0.00258
85	1550.6265	1550.583	1550.513	0.002805	0.007318	0.00451
90	1550.681	1550.643	1550.583	0.00245	0.006318	0.00387
95	1550.7355	1550.698	1550.653	0.002418	0.005319	0.00290
100	1550.79	1550.768	1550.733	0.001418	0.003675	0.00226
105	1550.8445	1550.808	1550.783	0.002353	0.003965	0.00161
110	1550.899	1550.878	1550.838	0.001354	0.003933	0.00258
115	1550.9535	1550.938	1550.913	0.000999	0.002611	0.00161
120	1551.008	1551.003	1551.003	0.000322	0.000322	0.00000



## Lampiran D

Tabel 4. Hasil Uji Repeatability Dan Perhitungan Standar Deviasi Sistem Sensor Keramik Mullite

temperature	$\lambda_B(\text{nm})$			$\lambda_B$ Rata-rata $\langle \lambda \rangle$	$[\lambda_1 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_2 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_3 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_1 - \langle \lambda \rangle]^2$	$[\lambda_2 - \langle \lambda \rangle]^2$	$[\lambda_3 - \langle \lambda \rangle]^2$	std Deviasi
	Data I	Data II	Data III								$\sigma$
27	1549.848	1549.808	1549.816	1549.824	0.024	0.016	0.008	0.000576	0.00026	0.00006	0.021
40	1549.888	1549.88	1549.88	1549.883	0.005	0.003	0.003	2.844E-05	0.00001	0.00001	0.005
45	1549.928	1549.92	1549.928	1549.925	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005
50	1549.976	1549.96	1549.976	1549.971	0.005	0.011	0.005	2.844E-05	0.00011	0.00003	0.009
55	1550.024	1550.016	1550.016	1550.019	0.005	0.003	0.003	2.844E-05	0.00001	0.00001	0.005
60	1550.072	1550.056	1550.048	1550.059	0.013	0.003	0.011	0.0001778	0.00001	0.00011	0.012
65	1550.12	1550.112	1550.104	1550.112	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
70	1550.168	1550.16	1550.152	1550.160	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
75	1550.232	1550.208	1550.208	1550.216	0.016	0.008	0.008	0.000256	0.00006	0.00006	0.014
80	1550.256	1550.248	1550.24	1550.248	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
85	1550.296	1550.288	1550.28	1550.288	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
90	1550.344	1550.344	1550.328	1550.339	0.005	0.005	0.011	2.844E-05	0.00003	0.00011	0.009
95	1550.4	1550.384	1550.376	1550.387	0.013	0.003	0.011	0.0001778	0.00001	0.00011	0.012
100	1550.44	1550.432	1550.424	1550.432	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
105	1550.496	1550.48	1550.496	1550.491	0.005	0.011	0.005	2.844E-05	0.00011	0.00003	0.009
110	1550.576	1550.536	1550.552	1550.555	0.021	0.019	0.003	0.0004551	0.00035	0.00001	0.020
115	1550.624	1550.608	1550.616	1550.616	0.008	0.008	0.000	6.4E-05	0.00006	0.00000	0.008
120	1550.688	1550.672	1550.68	1550.680	0.008	0.008	0.000	6.4E-05	0.00006	0.00000	0.008
125	1550.752	1550.76	1550.752	1550.755	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005

130	1550.808	1550.808	1550.792	1550.803	0.005	0.005	0.011	2.844E-05	0.00003	0.00011	0.009
135	1550.864	1550.864	1550.856	1550.861	0.003	0.003	0.005	7.111E-06	0.00001	0.00003	0.005
140	1550.912	1550.912	1550.904	1550.909	0.003	0.003	0.005	7.111E-06	0.00001	0.00003	0.005
145	1550.968	1550.968	1550.952	1550.963	0.005	0.005	0.011	2.844E-05	0.00003	0.00011	0.009
150	1551.024	1551.016	1551.008	1551.016	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
155	1551.088	1551.072	1551.056	1551.072	0.016	0.000	0.016	0.000256	0.00000	0.00026	0.016
160	1551.136	1551.12	1551.112	1551.123	0.013	0.003	0.011	0.0001778	0.00001	0.00011	0.012
165	1551.192	1551.176	1551.176	1551.181	0.011	0.005	0.005	0.0001138	0.00003	0.00003	0.009
170	1551.264	1551.24	1551.224	1551.243	0.021	0.003	0.019	0.0004551	0.00001	0.00035	0.020
175	1551.304	1551.296	1551.28	1551.293	0.011	0.003	0.013	0.0001138	0.00001	0.00018	0.012
180	1551.368	1551.344	1551.336	1551.349	0.019	0.005	0.013	0.0003484	0.00003	0.00018	0.017
185	1551.408	1551.392	1551.384	1551.395	0.013	0.003	0.011	0.0001778	0.00001	0.00011	0.012
190	1551.456	1551.448	1551.44	1551.448	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
195	1551.52	1551.504	1551.496	1551.507	0.013	0.003	0.011	0.0001778	0.00001	0.00011	0.012
200	1551.584	1551.56	1551.552	1551.565	0.019	0.005	0.013	0.0003484	0.00003	0.00018	0.017
205	1551.64	1551.632	1551.64	1551.637	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005
210	1551.728	1551.72	1551.72	1551.723	0.005	0.003	0.003	2.844E-05	0.00001	0.00001	0.005
215	1551.816	1551.8	1551.808	1551.808	0.008	0.008	0.000	6.4E-05	0.00006	0.00000	0.008
220	1551.904	1551.888	1551.888	1551.893	0.011	0.005	0.005	0.0001138	0.00003	0.00003	0.009
225	1551.976	1551.96	1551.968	1551.968	0.008	0.008	0.000	6.4E-05	0.00006	0.00000	0.008
230	1552.056	1552.048	1552.04	1552.048	0.008	0.000	0.008	6.4E-05	0.00000	0.00006	0.008
235	1552.128	1552.128	1552.12	1552.125	0.003	0.003	0.005	7.111E-06	0.00001	0.00003	0.005
240	1552.216	1552.208	1552.208	1552.211	0.005	0.003	0.003	2.844E-05	0.00001	0.00001	0.005
245	1552.296	1552.288	1552.296	1552.293	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005
250	1552.376	1552.368	1552.376	1552.373	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005

## Lampiran E

Tabel 5. Hasil pengujian dan perhitungan nilai Hysteresis pada sistem sensor  
Keramik Mullite

Temperatur	True Output (nm)	$\lambda_B$ (nm)		%FSO		%hysteresis
		Heating	Cooling	Heating	cooling	
27	1549.792	1549.816	1549.816	-0.00154	-0.00154	0
40	1549.893	1549.88	1549.872	0.00087	0.00138	0.000515339
50	1549.975	1549.976	1549.952	-0.00005	0.00150	0.001546017
60	1550.06	1550.048	1550.04	0.00080	0.00132	0.000515339
70	1550.149	1550.152	1550.152	-0.00019	-0.00019	0
80	1550.241	1550.24	1550.232	0.00006	0.00058	0.000515339
90	1550.336	1550.328	1550.328	0.00053	0.00053	0
100	1550.435	1550.424	1550.424	0.00071	0.00071	0
110	1550.537	1550.552	1550.552	-0.00096	-0.00096	1.46468E-14
120	1550.643	1550.68	1550.68	-0.00241	-0.00241	0
130	1550.751	1550.792	1550.808	-0.00261	-0.00365	0.001030678
140	1550.864	1550.904	1550.904	-0.00260	-0.00260	0
150	1550.979	1551.008	1551.008	-0.00185	-0.00185	0
160	1551.098	1551.112	1551.112	-0.00089	-0.00089	1.46469E-14
170	1551.221	1551.224	1551.24	-0.00022	-0.00125	0.001030678
180	1551.346	1551.336	1551.336	0.00067	0.00067	0
190	1551.475	1551.44	1551.44	0.00229	0.00229	0
200	1551.608	1551.552	1551.528	0.00361	0.00515	0.001546017
210	1551.744	1551.72	1551.688	0.00154	0.00360	0.002061356
220	1551.883	1551.888	1551.848	-0.00031	0.00226	0.002576695
230	1552.026	1552.04	1552.008	-0.00091	0.00115	0.002061356
240	1552.172	1552.208	1552.192	-0.00233	-0.00130	0.001030678
250	1552.321	1552.376	1552.376	-0.00353	-0.00353	0

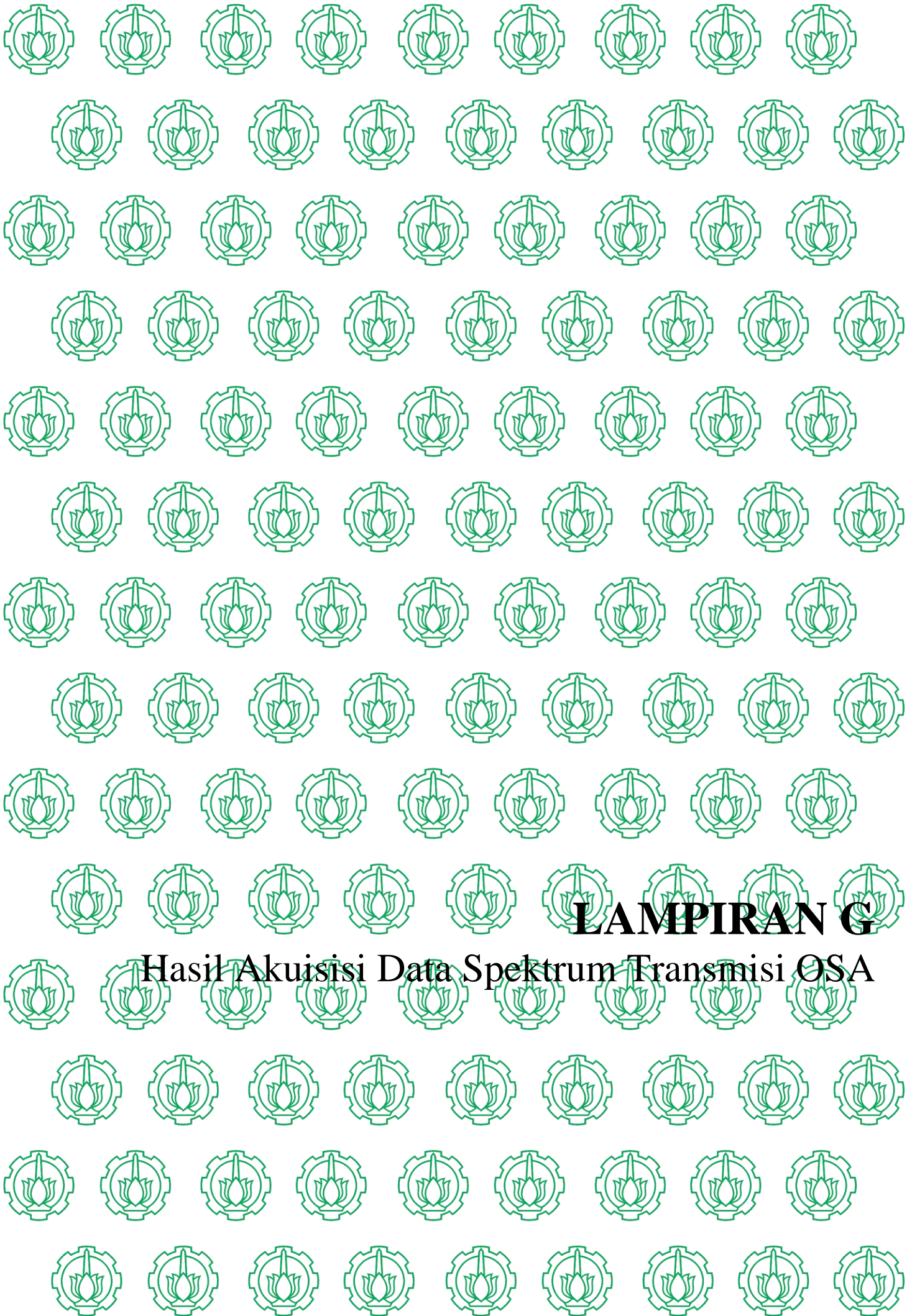




## Lampiran F

Tabel 6 Hasil Uji repeatability dan perhitungan standar deviasi sistem sensor keramik geopolimer

temperature	$\lambda_B(\text{nm})$			$\lambda_B$ Rata-rata $\langle \lambda \rangle$	$[\lambda_1 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_2 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_3 - \langle \lambda \rangle]$	$[\lambda_1 - \langle \lambda \rangle]^2$	$[\lambda_2 - \langle \lambda \rangle]^2$	$[\lambda_3 - \langle \lambda \rangle]^2$	std Deviasi
	Data I	Data II	Data III								
27	1549.808	1549.824	1549.784	1549.805	0.003	0.019	0.021	7.111E-06	0.00035	0.00046	0.020
50	1549.92	1549.896	1549.864	1549.893	0.027	0.003	0.029	0.0007111	0.00001	0.00086	0.028
60	1549.96	1549.936	1549.904	1549.933	0.027	0.003	0.029	0.0007111	0.00001	0.00086	0.028
70	1550.016	1549.968	1549.952	1549.979	0.037	0.011	0.027	0.0013938	0.00011	0.00071	0.033
80	1550.056	1550	1550.048	1550.035	0.021	0.035	0.013	0.0004551	0.00120	0.00018	0.030
90	1550.136	1550.064	1550.064	1550.088	0.048	0.024	0.024	0.002304	0.00058	0.00058	0.042
100	1550.176	1550.112	1550.136	1550.141	0.035	0.029	0.005	0.0012018	0.00086	0.00003	0.032
110	1550.224	1550.168	1550.2	1550.197	0.027	0.029	0.003	0.0007111	0.00086	0.00001	0.028
120	1550.272	1550.232	1550.256	1550.253	0.019	0.021	0.003	0.0003484	0.00046	0.00001	0.020
130	1550.32	1550.288	1550.288	1550.299	0.021	0.011	0.011	0.0004551	0.00011	0.00011	0.018
140	1550.384	1550.328	1550.36	1550.357	0.027	0.029	0.003	0.0007111	0.00086	0.00001	0.028
150	1550.464	1550.384	1550.44	1550.429	0.035	0.045	0.011	0.0012018	0.00206	0.00011	0.041
160	1550.512	1550.496	1550.52	1550.509	0.003	0.013	0.011	7.111E-06	0.00018	0.00011	0.012
170	1550.6	1550.624	1550.6	1550.608	0.008	0.016	0.008	6.4E-05	0.00026	0.00006	0.014
180	1550.72	1550.72	1550.736	1550.725	0.005	0.005	0.011	2.844E-05	0.00003	0.00011	0.009
190	1550.816	1550.824	1550.864	1550.835	0.019	0.011	0.029	0.0003484	0.00011	0.00086	0.026
200	1550.88	1550.912	1550.88	1550.891	0.011	0.021	0.011	0.0001138	0.00046	0.00011	0.018
210	1550.976	1550.984	1550.976	1550.979	0.003	0.005	0.003	7.111E-06	0.00003	0.00001	0.005
220	1551.072	1551.064	1551.032	1551.056	0.016	0.008	0.024	0.000256	0.00006	0.00058	0.021
230	1551.144	1551.152	1551.104	1551.133	0.011	0.019	0.029	0.0001138	0.00035	0.00086	0.026
240	1551.224	1551.176	1551.208	1551.203	0.021	0.027	0.005	0.0004551	0.00071	0.00003	0.024
250	1551.288	1551.304	1551.288	1551.293	0.005	0.011	0.005	2.844E-05	0.00011	0.00003	0.009



# LAMPIRAN G

Hasil Akuisisi Data Spektrum Transmisi OSA

TYPE	TRACE
DATE & TIME	11Apr2015 07:10PM EDT
INSTRUMENT	86142B
AIR/VACUUM/STP	VACUUM
TRACE	A
START	1545.832
STOP	1553.832
HORIZONTAL SCALE	nm
LENGTH (pts)	1001
RBW (nm)	0.1
VBW (Hz)	194
REFERENCE LEVEL (dBm)	-58
VERTICAL SCALE	dBm
SENSITIVITY (dBm)	-82.35
AVERAGING	OFF
MIN	OFF
MAX	OFF
SMOOTHING	OFF
TRACE MATH	OFF
OFFSET (dB)	0
MARKER	1
MARKER TRACE	A
MARKER X POSITION	1549.832
MARKER AMPLITUDE	-65.549
MARKER UNITS	dBm

A

Sistem Sensor Mullite ceramic Data 2

SN DE44103305 REV B.06.02

Temp 27

0.008											
INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ
1	-59.899	1545.832	251	-59.441	1547.832	501	-65.549	1549.832	751	-59.321	1551.832
2	-59.895	1545.84	252	-59.441	1547.84	502	-65.704	1549.84	752	-59.33	1551.84
3	-59.9	1545.848	253	-59.432	1547.848	503	-65.777	1549.848	753	-59.345	1551.848
4	-59.903	1545.856	254	-59.43	1547.856	504	-65.775	1549.856	754	-59.349	1551.856
5	-59.899	1545.864	255	-59.429	1547.864	505	-65.623	1549.864	755	-59.353	1551.864
6	-59.897	1545.872	256	-59.433	1547.872	506	-65.418	1549.872	756	-59.366	1551.872
7	-59.903	1545.88	257	-59.428	1547.88	507	-65.174	1549.88	757	-59.365	1551.88
8	-59.916	1545.888	258	-59.418	1547.888	508	-64.795	1549.888	758	-59.367	1551.888
9	-59.911	1545.896	259	-59.405	1547.896	509	-64.397	1549.896	759	-59.378	1551.896
10	-59.909	1545.904	260	-59.408	1547.904	510	-63.948	1549.904	760	-59.388	1551.904
11	-59.915	1545.912	261	-59.395	1547.912	511	-63.369	1549.912	761	-59.39	1551.912
12	-59.93	1545.92	262	-59.383	1547.92	512	-62.836	1549.92	762	-59.394	1551.92
13	-59.94	1545.928	263	-59.378	1547.928	513	-62.351	1549.928	763	-59.404	1551.928
14	-59.94	1545.936	264	-59.374	1547.936	514	-61.809	1549.936	764	-59.408	1551.936
15	-59.945	1545.944	265	-59.366	1547.944	515	-61.33	1549.944	765	-59.404	1551.944
16	-59.951	1545.952	266	-59.357	1547.952	516	-60.807	1549.952	766	-59.407	1551.952
17	-59.961	1545.96	267	-59.346	1547.96	517	-60.374	1549.96	767	-59.421	1551.96
18	-59.964	1545.968	268	-59.331	1547.968	518	-60.016	1549.968	768	-59.43	1551.968
19	-59.963	1545.976	269	-59.322	1547.976	519	-59.648	1549.976	769	-59.438	1551.976
20	-59.956	1545.984	270	-59.308	1547.984	520	-59.361	1549.984	770	-59.435	1551.984
21	-59.95	1545.992	271	-59.294	1547.992	521	-59.148	1549.992	771	-59.451	1551.992
22	-59.953	1546	272	-59.291	1548	522	-58.908	1550	772	-59.448	1552
23	-59.948	1546.008	273	-59.296	1548.008	523	-58.742	1550.008	773	-59.439	1552.008
24	-59.95	1546.016	274	-59.282	1548.016	524	-58.593	1550.016	774	-59.444	1552.016
25	-59.943	1546.024	275	-59.261	1548.024	525	-58.493	1550.024	775	-59.44	1552.024
26	-59.944	1546.032	276	-59.253	1548.032	526	-58.417	1550.032	776	-59.449	1552.032
27	-59.944	1546.04	277	-59.255	1548.04	527	-58.356	1550.04	777	-59.457	1552.04
28	-59.943	1546.048	278	-59.254	1548.048	528	-58.315	1550.048	778	-59.456	1552.048
29	-59.944	1546.056	279	-59.249	1548.056	529	-58.291	1550.056	779	-59.459	1552.056
30	-59.946	1546.064	280	-59.239	1548.064	530	-58.269	1550.064	780	-59.466	1552.064
31	-59.943	1546.072	281	-59.237	1548.072	531	-58.249	1550.072	781	-59.472	1552.072
32	-59.944	1546.08	282	-59.231	1548.08	532	-58.241	1550.08	782	-59.473	1552.08
33	-59.938	1546.088	283	-59.232	1548.088	533	-58.237	1550.088	783	-59.475	1552.088
34	-59.925	1546.096	284	-59.237	1548.096	534	-58.235	1550.096	784	-59.467	1552.096
35	-59.924	1546.104	285	-59.235	1548.104	535	-58.224	1550.104	785	-59.473	1552.104
36	-59.93	1546.112	286	-59.227	1548.112	536	-58.221	1550.112	786	-59.481	1552.112
37	-59.924	1546.12	287	-59.223	1548.12	537	-58.224	1550.12	787	-59.483	1552.12
38	-59.929	1546.128	288	-59.213	1548.128	538	-58.224	1550.128	788	-59.487	1552.128
39	-59.931	1546.136	289	-59.205	1548.136	539	-58.225	1550.136	789	-59.488	1552.136
40	-59.918	1546.144	290	-59.204	1548.144	540	-58.226	1550.144	790	-59.487	1552.144
41	-59.925	1546.152	291	-59.198	1548.152	541	-58.22	1550.152	791	-59.492	1552.152

42	-59.929	1546.16	292	-59.191	1548.16	542	-58.222	1550.16	792	-59.491	1552.16
43	-59.922	1546.168	293	-59.185	1548.168	543	-58.226	1550.168	793	-59.492	1552.168
44	-59.928	1546.176	294	-59.178	1548.176	544	-58.225	1550.176	794	-59.493	1552.176
45	-59.928	1546.184	295	-59.176	1548.184	545	-58.227	1550.184	795	-59.501	1552.184
46	-59.93	1546.192	296	-59.168	1548.192	546	-58.223	1550.192	796	-59.499	1552.192
47	-59.928	1546.2	297	-59.16	1548.2	547	-58.223	1550.2	797	-59.498	1552.2
48	-59.93	1546.208	298	-59.149	1548.208	548	-58.231	1550.208	798	-59.498	1552.208
49	-59.943	1546.216	299	-59.144	1548.216	549	-58.234	1550.216	799	-59.499	1552.216
50	-59.945	1546.224	300	-59.134	1548.224	550	-58.232	1550.224	800	-59.502	1552.224
51	-59.948	1546.232	301	-59.128	1548.232	551	-58.235	1550.232	801	-59.504	1552.232
52	-59.95	1546.24	302	-59.131	1548.24	552	-58.242	1550.24	802	-59.512	1552.24
53	-59.952	1546.248	303	-59.117	1548.248	553	-58.252	1550.248	803	-59.511	1552.248
54	-59.948	1546.256	304	-59.112	1548.256	554	-58.251	1550.256	804	-59.512	1552.256
55	-59.948	1546.264	305	-59.114	1548.264	555	-58.255	1550.264	805	-59.51	1552.264
56	-59.951	1546.272	306	-59.118	1548.272	556	-58.259	1550.272	806	-59.506	1552.272
57	-59.951	1546.28	307	-59.123	1548.28	557	-58.261	1550.28	807	-59.499	1552.28
58	-59.959	1546.288	308	-59.117	1548.288	558	-58.258	1550.288	808	-59.495	1552.288
59	-59.955	1546.296	309	-59.113	1548.296	559	-58.26	1550.296	809	-59.497	1552.296
60	-59.953	1546.304	310	-59.112	1548.304	560	-58.264	1550.304	810	-59.5	1552.304
61	-59.962	1546.312	311	-59.112	1548.312	561	-58.268	1550.312	811	-59.496	1552.312
62	-59.973	1546.32	312	-59.115	1548.32	562	-58.274	1550.32	812	-59.491	1552.32
63	-59.961	1546.328	313	-59.117	1548.328	563	-58.275	1550.328	813	-59.491	1552.328
64	-59.957	1546.336	314	-59.108	1548.336	564	-58.278	1550.336	814	-59.496	1552.336
65	-59.957	1546.344	315	-59.107	1548.344	565	-58.277	1550.344	815	-59.489	1552.344
66	-59.961	1546.352	316	-59.108	1548.352	566	-58.281	1550.352	816	-59.489	1552.352
67	-59.956	1546.36	317	-59.107	1548.36	567	-58.281	1550.36	817	-59.485	1552.36
68	-59.947	1546.368	318	-59.106	1548.368	568	-58.289	1550.368	818	-59.489	1552.368
69	-59.943	1546.376	319	-59.1	1548.376	569	-58.293	1550.376	819	-59.488	1552.376
70	-59.954	1546.384	320	-59.095	1548.384	570	-58.291	1550.384	820	-59.481	1552.384
71	-59.963	1546.392	321	-59.097	1548.392	571	-58.298	1550.392	821	-59.479	1552.392
72	-59.968	1546.4	322	-59.091	1548.4	572	-58.296	1550.4	822	-59.472	1552.4
73	-59.969	1546.408	323	-59.093	1548.408	573	-58.302	1550.408	823	-59.477	1552.408
74	-59.971	1546.416	324	-59.093	1548.416	574	-58.307	1550.416	824	-59.472	1552.416
75	-59.973	1546.424	325	-59.086	1548.424	575	-58.312	1550.424	825	-59.478	1552.424
76	-59.974	1546.432	326	-59.085	1548.432	576	-58.314	1550.432	826	-59.482	1552.432
77	-59.976	1546.44	327	-59.082	1548.44	577	-58.322	1550.44	827	-59.466	1552.44
78	-59.976	1546.448	328	-59.075	1548.448	578	-58.321	1550.448	828	-59.472	1552.448
79	-59.972	1546.456	329	-59.066	1548.456	579	-58.323	1550.456	829	-59.479	1552.456
80	-59.97	1546.464	330	-59.061	1548.464	580	-58.329	1550.464	830	-59.476	1552.464
81	-59.968	1546.472	331	-59.051	1548.472	581	-58.328	1550.472	831	-59.476	1552.472
82	-59.971	1546.48	332	-59.048	1548.48	582	-58.331	1550.48	832	-59.477	1552.48
83	-59.98	1546.488	333	-59.053	1548.488	583	-58.334	1550.488	833	-59.48	1552.488
84	-59.976	1546.496	334	-59.045	1548.496	584	-58.337	1550.496	834	-59.482	1552.496
85	-59.979	1546.504	335	-59.041	1548.504	585	-58.342	1550.504	835	-59.486	1552.504
86	-59.98	1546.512	336	-59.036	1548.512	586	-58.343	1550.512	836	-59.486	1552.512
87	-59.988	1546.52	337	-59.036	1548.52	587	-58.345	1550.52	837	-59.488	1552.52
88	-59.99	1546.528	338	-59.03	1548.528	588	-58.351	1550.528	838	-59.494	1552.528
89	-59.99	1546.536	339	-59.029	1548.536	589	-58.355	1550.536	839	-59.494	1552.536
90	-59.998	1546.544	340	-59.015	1548.544	590	-58.359	1550.544	840	-59.499	1552.544
91	-60.003	1546.552	341	-59.014	1548.552	591	-58.367	1550.552	841	-59.511	1552.552
92	-59.984	1546.56	342	-59.006	1548.56	592	-58.366	1550.56	842	-59.514	1552.56
93	-59.997	1546.568	343	-58.997	1548.568	593	-58.373	1550.568	843	-59.517	1552.568
94	-60.001	1546.576	344	-58.996	1548.576	594	-58.381	1550.576	844	-59.522	1552.576
95	-60.001	1546.584	345	-58.988	1548.584	595	-58.382	1550.584	845	-59.527	1552.584
96	-59.998	1546.592	346	-58.989	1548.592	596	-58.387	1550.592	846	-59.532	1552.592
97	-59.999	1546.6	347	-58.981	1548.6	597	-58.39	1550.6	847	-59.541	1552.6
98	-60.003	1546.608	348	-58.965	1548.608	598	-58.397	1550.608	848	-59.549	1552.608
99	-60.004	1546.616	349	-58.957	1548.616	599	-58.397	1550.616	849	-59.552	1552.616
100	-60.003	1546.624	350	-58.951	1548.624	600	-58.402	1550.624	850	-59.559	1552.624
101	-59.995	1546.632	351	-58.948	1548.632	601	-58.408	1550.632	851	-59.569	1552.632
102	-59.997	1546.64	352	-58.934	1548.64	602	-58.417	1550.64	852	-59.576	1552.64
103	-60.002	1546.648	353	-58.926	1548.648	603	-58.417	1550.648	853	-59.584	1552.648
104	-59.997	1546.656	354	-58.916	1548.656	604	-58.425	1550.656	854	-59.586	1552.656
105	-60.001	1546.664	355	-58.913	1548.664	605	-58.434	1550.664	855	-59.592	1552.664
106	-59.993	1546.672	356	-58.911	1548.672	606	-58.437	1550.672	856	-59.6	1552.672
107	-59.995	1546.68	357	-58.909	1548.68	607	-58.44	1550.68	857	-59.612	1552.68
108	-59.996	1546.688	358	-58.901	1548.688	608	-58.445	1550.688	858	-59.619	1552.688
109	-60.001	1546.696	359	-58.894	1548.696	609	-58.448	1550.696	859	-59.621	1552.696
110	-60	1546.704	360	-58.887	1548.704	610	-58.453	1550.704	860	-59.624	1552.704
111	-59.99	1546.712	361	-58.884	1548.712	611	-58.467	1550.712	861	-59.631	1552.712
112	-60.002	1546.72	362	-58.879	1548.72	612	-58.467	1550.72	862	-59.634	1552.72
113	-60.002	1546.728	363	-58.884	1548.728	613	-58.471	1550.728	863	-59.643	1552.728
114	-59.996	1546.736	364	-58.88	1548.736	614	-58.486	1550.736	864	-59.646	1552.736

115	-60.002	1546.744	365	-58.869	1548.744	615	-58.491	1550.744	865	-59.654	1552.744
116	-60.002	1546.752	366	-58.854	1548.752	616	-58.498	1550.752	866	-59.664	1552.752
117	-60.008	1546.76	367	-58.85	1548.76	617	-58.507	1550.76	867	-59.671	1552.76
118	-60.003	1546.768	368	-58.847	1548.768	618	-58.513	1550.768	868	-59.678	1552.768
119	-59.999	1546.776	369	-58.844	1548.776	619	-58.515	1550.776	869	-59.679	1552.776
120	-59.995	1546.784	370	-58.84	1548.784	620	-58.517	1550.784	870	-59.683	1552.784
121	-59.985	1546.792	371	-58.829	1548.792	621	-58.524	1550.792	871	-59.696	1552.792
122	-59.98	1546.8	372	-58.815	1548.8	622	-58.517	1550.8	872	-59.708	1552.8
123	-59.98	1546.808	373	-58.815	1548.808	623	-58.521	1550.808	873	-59.706	1552.808
124	-59.983	1546.816	374	-58.809	1548.816	624	-58.525	1550.816	874	-59.706	1552.816
125	-59.977	1546.824	375	-58.802	1548.824	625	-58.534	1550.824	875	-59.718	1552.824
126	-59.982	1546.832	376	-58.792	1548.832	626	-58.537	1550.832	876	-59.717	1552.832
127	-59.972	1546.84	377	-58.787	1548.84	627	-58.541	1550.84	877	-59.717	1552.84
128	-59.965	1546.848	378	-58.786	1548.848	628	-58.552	1550.848	878	-59.723	1552.848
129	-59.967	1546.856	379	-58.785	1548.856	629	-58.56	1550.856	879	-59.734	1552.856
130	-59.965	1546.864	380	-58.78	1548.864	630	-58.564	1550.864	880	-59.741	1552.864
131	-59.961	1546.872	381	-58.778	1548.872	631	-58.564	1550.872	881	-59.75	1552.872
132	-59.954	1546.88	382	-58.77	1548.88	632	-58.572	1550.88	882	-59.758	1552.88
133	-59.956	1546.888	383	-58.761	1548.888	633	-58.579	1550.888	883	-59.762	1552.888
134	-59.962	1546.896	384	-58.754	1548.896	634	-58.577	1550.896	884	-59.768	1552.896
135	-59.96	1546.904	385	-58.744	1548.904	635	-58.588	1550.904	885	-59.767	1552.904
136	-59.965	1546.912	386	-58.74	1548.912	636	-58.595	1550.912	886	-59.766	1552.912
137	-59.968	1546.92	387	-58.745	1548.92	637	-58.607	1550.92	887	-59.778	1552.92
138	-59.964	1546.928	388	-58.745	1548.928	638	-58.612	1550.928	888	-59.785	1552.928
139	-59.961	1546.936	389	-58.741	1548.936	639	-58.613	1550.936	889	-59.792	1552.936
140	-59.957	1546.944	390	-58.727	1548.944	640	-58.618	1550.944	890	-59.8	1552.944
141	-59.948	1546.952	391	-58.716	1548.952	641	-58.627	1550.952	891	-59.803	1552.952
142	-59.946	1546.96	392	-58.705	1548.96	642	-58.633	1550.96	892	-59.814	1552.96
143	-59.941	1546.968	393	-58.7	1548.968	643	-58.644	1550.968	893	-59.817	1552.968
144	-59.929	1546.976	394	-58.702	1548.976	644	-58.654	1550.976	894	-59.822	1552.976
145	-59.924	1546.984	395	-58.701	1548.984	645	-58.662	1550.984	895	-59.842	1552.984
146	-59.919	1546.992	396	-58.693	1548.992	646	-58.678	1550.992	896	-59.853	1552.992
147	-59.911	1547	397	-58.688	1549	647	-58.686	1551	897	-59.861	1553
148	-59.902	1547.008	398	-58.682	1549.008	648	-58.69	1551.008	898	-59.864	1553.008
149	-59.895	1547.016	399	-58.681	1549.016	649	-58.692	1551.016	899	-59.876	1553.016
150	-59.885	1547.024	400	-58.674	1549.024	650	-58.701	1551.024	900	-59.878	1553.024
151	-59.88	1547.032	401	-58.671	1549.032	651	-58.712	1551.032	901	-59.886	1553.032
152	-59.876	1547.04	402	-58.675	1549.04	652	-58.726	1551.04	902	-59.897	1553.04
153	-59.877	1547.048	403	-58.669	1549.048	653	-58.733	1551.048	903	-59.916	1553.048
154	-59.873	1547.056	404	-58.665	1549.056	654	-58.739	1551.056	904	-59.926	1553.056
155	-59.873	1547.064	405	-58.668	1549.064	655	-58.75	1551.064	905	-59.928	1553.064
156	-59.862	1547.072	406	-58.665	1549.072	656	-58.757	1551.072	906	-59.931	1553.072
157	-59.856	1547.08	407	-58.661	1549.08	657	-58.768	1551.08	907	-59.939	1553.08
158	-59.86	1547.088	408	-58.658	1549.088	658	-58.77	1551.088	908	-59.946	1553.088
159	-59.853	1547.096	409	-58.65	1549.096	659	-58.779	1551.096	909	-59.957	1553.096
160	-59.847	1547.104	410	-58.643	1549.104	660	-58.79	1551.104	910	-59.968	1553.104
161	-59.847	1547.112	411	-58.644	1549.112	661	-58.792	1551.112	911	-59.978	1553.112
162	-59.85	1547.12	412	-58.646	1549.12	662	-58.806	1551.12	912	-59.992	1553.12
163	-59.844	1547.128	413	-58.645	1549.128	663	-58.819	1551.128	913	-59.998	1553.128
164	-59.836	1547.136	414	-58.637	1549.136	664	-58.823	1551.136	914	-60.009	1553.136
165	-59.832	1547.144	415	-58.638	1549.144	665	-58.833	1551.144	915	-60.018	1553.144
166	-59.817	1547.152	416	-58.633	1549.152	666	-58.84	1551.152	916	-60.03	1553.152
167	-59.809	1547.16	417	-58.634	1549.16	667	-58.842	1551.16	917	-60.049	1553.16
168	-59.809	1547.168	418	-58.624	1549.168	668	-58.855	1551.168	918	-60.052	1553.168
169	-59.801	1547.176	419	-58.613	1549.176	669	-58.865	1551.176	919	-60.056	1553.176
170	-59.792	1547.184	420	-58.614	1549.184	670	-58.868	1551.184	920	-60.066	1553.184
171	-59.792	1547.192	421	-58.613	1549.192	671	-58.869	1551.192	921	-60.078	1553.192
172	-59.788	1547.2	422	-58.605	1549.2	672	-58.888	1551.2	922	-60.08	1553.2
173	-59.772	1547.208	423	-58.604	1549.208	673	-58.897	1551.208	923	-60.094	1553.208
174	-59.771	1547.216	424	-58.596	1549.216	674	-58.901	1551.216	924	-60.103	1553.216
175	-59.767	1547.224	425	-58.593	1549.224	675	-58.911	1551.224	925	-60.111	1553.224
176	-59.764	1547.232	426	-58.589	1549.232	676	-58.913	1551.232	926	-60.129	1553.232
177	-59.76	1547.24	427	-58.578	1549.24	677	-58.913	1551.24	927	-60.13	1553.24
178	-59.751	1547.248	428	-58.576	1549.248	678	-58.923	1551.248	928	-60.144	1553.248
179	-59.749	1547.256	429	-58.572	1549.256	679	-58.926	1551.256	929	-60.153	1553.256
180	-59.745	1547.264	430	-58.554	1549.264	680	-58.934	1551.264	930	-60.153	1553.264
181	-59.729	1547.272	431	-58.549	1549.272	681	-58.952	1551.272	931	-60.164	1553.272
182	-59.73	1547.28	432	-58.552	1549.28	682	-58.96	1551.28	932	-60.175	1553.28
183	-59.721	1547.288	433	-58.536	1549.288	683	-58.964	1551.288	933	-60.178	1553.288
184	-59.717	1547.296	434	-58.532	1549.296	684	-58.975	1551.296	934	-60.188	1553.296
185	-59.715	1547.304	435	-58.523	1549.304	685	-58.982	1551.304	935	-60.197	1553.304
186	-59.713	1547.312	436	-58.515	1549.312	686	-58.992	1551.312	936	-60.196	1553.312
187	-59.714	1547.32	437	-58.508	1549.32	687	-58.994	1551.32	937	-60.208	1553.32



188	-59.701	1547.328	438	-58.497	1549.328	688	-58.992	1551.328	938	-60.219	1553.328
189	-59.692	1547.336	439	-58.495	1549.336	689	-59.004	1551.336	939	-60.226	1553.336
190	-59.693	1547.344	440	-58.491	1549.344	690	-59.014	1551.344	940	-60.236	1553.344
191	-59.691	1547.352	441	-58.484	1549.352	691	-59.027	1551.352	941	-60.25	1553.352
192	-59.687	1547.36	442	-58.483	1549.36	692	-59.035	1551.36	942	-60.252	1553.36
193	-59.683	1547.368	443	-58.479	1549.368	693	-59.045	1551.368	943	-60.256	1553.368
194	-59.682	1547.376	444	-58.466	1549.376	694	-59.05	1551.376	944	-60.262	1553.376
195	-59.68	1547.384	445	-58.462	1549.384	695	-59.056	1551.384	945	-60.265	1553.384
196	-59.669	1547.392	446	-58.458	1549.392	696	-59.063	1551.392	946	-60.274	1553.392
197	-59.657	1547.4	447	-58.456	1549.4	697	-59.07	1551.4	947	-60.294	1553.4
198	-59.651	1547.408	448	-58.448	1549.408	698	-59.079	1551.408	948	-60.294	1553.408
199	-59.646	1547.416	449	-58.443	1549.416	699	-59.087	1551.416	949	-60.3	1553.416
200	-59.641	1547.424	450	-58.436	1549.424	700	-59.089	1551.424	950	-60.303	1553.424
201	-59.634	1547.432	451	-58.432	1549.432	701	-59.093	1551.432	951	-60.303	1553.432
202	-59.634	1547.44	452	-58.428	1549.44	702	-59.102	1551.44	952	-60.309	1553.44
203	-59.627	1547.448	453	-58.43	1549.448	703	-59.109	1551.448	953	-60.308	1553.448
204	-59.614	1547.456	454	-58.424	1549.456	704	-59.114	1551.456	954	-60.308	1553.456
205	-59.608	1547.464	455	-58.418	1549.464	705	-59.11	1551.464	955	-60.311	1553.464
206	-59.603	1547.472	456	-58.412	1549.472	706	-59.113	1551.472	956	-60.311	1553.472
207	-59.597	1547.48	457	-58.406	1549.48	707	-59.116	1551.48	957	-60.314	1553.48
208	-59.589	1547.488	458	-58.405	1549.488	708	-59.123	1551.488	958	-60.318	1553.488
209	-59.587	1547.496	459	-58.399	1549.496	709	-59.128	1551.496	959	-60.321	1553.496
210	-59.589	1547.504	460	-58.396	1549.504	710	-59.132	1551.504	960	-60.328	1553.504
211	-59.589	1547.512	461	-58.397	1549.512	711	-59.135	1551.512	961	-60.333	1553.512
212	-59.585	1547.52	462	-58.388	1549.52	712	-59.141	1551.52	962	-60.335	1553.52
213	-59.588	1547.528	463	-58.386	1549.528	713	-59.148	1551.528	963	-60.334	1553.528
214	-59.584	1547.536	464	-58.39	1549.536	714	-59.147	1551.536	964	-60.336	1553.536
215	-59.582	1547.544	465	-58.386	1549.544	715	-59.157	1551.544	965	-60.342	1553.544
216	-59.582	1547.552	466	-58.385	1549.552	716	-59.16	1551.552	966	-60.344	1553.552
217	-59.583	1547.56	467	-58.385	1549.56	717	-59.162	1551.56	967	-60.353	1553.56
218	-59.58	1547.568	468	-58.378	1549.568	718	-59.17	1551.568	968	-60.349	1553.568
219	-59.586	1547.576	469	-58.372	1549.576	719	-59.173	1551.576	969	-60.349	1553.576
220	-59.58	1547.584	470	-58.372	1549.584	720	-59.181	1551.584	970	-60.348	1553.584
221	-59.577	1547.592	471	-58.374	1549.592	721	-59.186	1551.592	971	-60.351	1553.592
222	-59.562	1547.6	472	-58.365	1549.6	722	-59.179	1551.6	972	-60.35	1553.6
223	-59.551	1547.608	473	-58.364	1549.608	723	-59.182	1551.608	973	-60.351	1553.608
224	-59.543	1547.616	474	-58.363	1549.616	724	-59.185	1551.616	974	-60.36	1553.616
225	-59.532	1547.624	475	-58.373	1549.624	725	-59.19	1551.624	975	-60.366	1553.624
226	-59.53	1547.632	476	-58.376	1549.632	726	-59.197	1551.632	976	-60.37	1553.632
227	-59.523	1547.64	477	-58.379	1549.64	727	-59.2	1551.64	977	-60.369	1553.64
228	-59.517	1547.648	478	-58.388	1549.648	728	-59.21	1551.648	978	-60.379	1553.648
229	-59.517	1547.656	479	-58.401	1549.656	729	-59.208	1551.656	979	-60.382	1553.656
230	-59.507	1547.664	480	-58.431	1549.664	730	-59.214	1551.664	980	-60.376	1553.664
231	-59.503	1547.672	481	-58.479	1549.672	731	-59.229	1551.672	981	-60.382	1553.672
232	-59.491	1547.68	482	-58.537	1549.68	732	-59.222	1551.68	982	-60.379	1553.68
233	-59.484	1547.688	483	-58.615	1549.688	733	-59.231	1551.688	983	-60.395	1553.688
234	-59.482	1547.696	484	-58.749	1549.696	734	-59.241	1551.696	984	-60.4	1553.696
235	-59.473	1547.704	485	-58.899	1549.704	735	-59.252	1551.704	985	-60.405	1553.704
236	-59.461	1547.712	486	-59.1	1549.712	736	-59.25	1551.712	986	-60.404	1553.712
237	-59.455	1547.72	487	-59.37	1549.72	737	-59.258	1551.72	987	-60.409	1553.72
238	-59.447	1547.728	488	-59.691	1549.728	738	-59.264	1551.728	988	-60.412	1553.728
239	-59.443	1547.736	489	-60.105	1549.736	739	-59.271	1551.736	989	-60.416	1553.736
240	-59.437	1547.744	490	-60.476	1549.744	740	-59.272	1551.744	990	-60.427	1553.744
241	-59.431	1547.752	491	-60.911	1549.752	741	-59.27	1551.752	991	-60.431	1553.752
242	-59.43	1547.76	492	-61.481	1549.76	742	-59.272	1551.76	992	-60.437	1553.76
243	-59.425	1547.768	493	-61.972	1549.768	743	-59.281	1551.768	993	-60.44	1553.768
244	-59.426	1547.776	494	-62.458	1549.776	744	-59.298	1551.776	994	-60.433	1553.776
245	-59.424	1547.784	495	-63.028	1549.784	745	-59.297	1551.784	995	-60.438	1553.784
246	-59.429	1547.792	496	-63.553	1549.792	746	-59.296	1551.792	996	-60.449	1553.792
247	-59.433	1547.8	497	-64.084	1549.8	747	-59.3	1551.8	997	-60.452	1553.8
248	-59.436	1547.808	498	-64.558	1549.808	748	-59.31	1551.808	998	-60.447	1553.808
249	-59.439	1547.816	499	-64.958	1549.816	749	-59.306	1551.816	999	-60.449	1553.816
250	-59.438	1547.824	500	-65.337	1549.824	750	-59.316	1551.824	1000	-60.454	1553.824
									1001	-60.456	1553.832

TYPE	TRACE
DATE & TIME	11Apr2015 08:19PM EDT
INSTRUMENT	86142B
AIR/VACUUM/STP	VACUUM
TRACE	A
START	1545.896
STOP	1553.896
HORIZONTAL SCALE	nm
LENGTH (pts)	1001
RBW (nm)	0.1
VBW (Hz)	194
REFERENCE LEVEL (dBm)	-58
VERTICAL SCALE	dBm
SENSITIVITY (dBm)	-82.34
AVERAGING	OFF
MIN	OFF
MAX	OFF
SMOOTHING	OFF
TRACE MATH	OFF
OFFSET (dB)	0
MARKER	1
MARKER TRACE	A
MARKER X POSITION	1549.896
MARKER AMPLITUDE	-64.209
MARKER UNITS	dBm

A  
SN DE44103305    REV B.06.02

Temp                      40

0.008

INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ	INDEX	Intensitas	λ
1	-58.962	1545.896	251	-56.564	1547.896	501	-64.209	1549.896	751	-57.637	1551.896
2	-58.955	1545.904	252	-56.562	1547.904	502	-64.116	1549.904	752	-57.64	1551.904
3	-58.949	1545.912	253	-56.549	1547.912	503	-63.866	1549.912	753	-57.635	1551.912
4	-58.945	1545.92	254	-56.539	1547.92	504	-63.604	1549.92	754	-57.628	1551.92
5	-58.93	1545.928	255	-56.528	1547.928	505	-63.289	1549.928	755	-57.622	1551.928
6	-58.915	1545.936	256	-56.52	1547.936	506	-62.863	1549.936	756	-57.624	1551.936
7	-58.903	1545.944	257	-56.516	1547.944	507	-62.418	1549.944	757	-57.617	1551.944
8	-58.896	1545.952	258	-56.505	1547.952	508	-61.967	1549.952	758	-57.614	1551.952
9	-58.892	1545.96	259	-56.489	1547.96	509	-61.451	1549.96	759	-57.614	1551.96
10	-58.881	1545.968	260	-56.471	1547.968	510	-60.953	1549.968	760	-57.616	1551.968
11	-58.871	1545.976	261	-56.456	1547.976	511	-60.498	1549.976	761	-57.609	1551.976
12	-58.86	1545.984	262	-56.436	1547.984	512	-59.952	1549.984	762	-57.609	1551.984
13	-58.842	1545.992	263	-56.421	1547.992	513	-59.499	1549.992	763	-57.609	1551.992
14	-58.824	1546	264	-56.405	1548	514	-59.042	1550	764	-57.605	1552
15	-58.824	1546.008	265	-56.399	1548.008	515	-58.698	1550.008	765	-57.596	1552.008
16	-58.814	1546.016	266	-56.381	1548.016	516	-58.402	1550.016	766	-57.594	1552.016
17	-58.795	1546.024	267	-56.37	1548.024	517	-58.082	1550.024	767	-57.586	1552.024
18	-58.78	1546.032	268	-56.364	1548.032	518	-57.804	1550.032	768	-57.582	1552.032
19	-58.769	1546.04	269	-56.361	1548.04	519	-57.608	1550.04	769	-57.58	1552.04
20	-58.758	1546.048	270	-56.346	1548.048	520	-57.432	1550.048	770	-57.582	1552.048
21	-58.749	1546.056	271	-56.339	1548.056	521	-57.3	1550.056	771	-57.584	1552.056
22	-58.735	1546.064	272	-56.33	1548.064	522	-57.177	1550.064	772	-57.578	1552.064
23	-58.718	1546.072	273	-56.324	1548.072	523	-57.075	1550.072	773	-57.573	1552.072
24	-58.711	1546.08	274	-56.321	1548.08	524	-57.009	1550.08	774	-57.566	1552.08
25	-58.691	1546.088	275	-56.321	1548.088	525	-56.961	1550.088	775	-57.554	1552.088
26	-58.68	1546.096	276	-56.32	1548.096	526	-56.921	1550.096	776	-57.548	1552.096
27	-58.674	1546.104	277	-56.32	1548.104	527	-56.897	1550.104	777	-57.544	1552.104
28	-58.659	1546.112	278	-56.315	1548.112	528	-56.875	1550.112	778	-57.545	1552.112
29	-58.646	1546.12	279	-56.308	1548.12	529	-56.866	1550.12	779	-57.53	1552.12
30	-58.623	1546.128	280	-56.299	1548.128	530	-56.862	1550.128	780	-57.523	1552.128
31	-58.606	1546.136	281	-56.298	1548.136	531	-56.86	1550.136	781	-57.515	1552.136
32	-58.601	1546.144	282	-56.291	1548.144	532	-56.858	1550.144	782	-57.509	1552.144
33	-58.596	1546.152	283	-56.286	1548.152	533	-56.87	1550.152	783	-57.502	1552.152
34	-58.578	1546.16	284	-56.276	1548.16	534	-56.878	1550.16	784	-57.495	1552.16
35	-58.569	1546.168	285	-56.267	1548.168	535	-56.881	1550.168	785	-57.486	1552.168
36	-58.555	1546.176	286	-56.263	1548.176	536	-56.881	1550.176	786	-57.485	1552.176
37	-58.54	1546.184	287	-56.248	1548.184	537	-56.88	1550.184	787	-57.477	1552.184
38	-58.529	1546.192	288	-56.246	1548.192	538	-56.886	1550.192	788	-57.473	1552.192
39	-58.523	1546.2	289	-56.242	1548.2	539	-56.895	1550.2	789	-57.465	1552.2
40	-58.513	1546.208	290	-56.236	1548.208	540	-56.895	1550.208	790	-57.456	1552.208
41	-58.504	1546.216	291	-56.226	1548.216	541	-56.901	1550.216	791	-57.453	1552.216
42	-58.494	1546.224	292	-56.22	1548.224	542	-56.906	1550.224	792	-57.445	1552.224
43	-58.487	1546.232	293	-56.218	1548.232	543	-56.913	1550.232	793	-57.44	1552.232
44	-58.475	1546.24	294	-56.211	1548.24	544	-56.921	1550.24	794	-57.435	1552.24
45	-58.465	1546.248	295	-56.202	1548.248	545	-56.927	1550.248	795	-57.43	1552.248
46	-58.462	1546.256	296	-56.197	1548.256	546	-56.928	1550.256	796	-57.425	1552.256



INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$
47	-58.45	1546.264	297	-56.193	1548.264	547	-56.938	1550.264	797	-57.415	1552.264
48	-58.438	1546.272	298	-56.183	1548.272	548	-56.944	1550.272	798	-57.408	1552.272
49	-58.435	1546.28	299	-56.172	1548.28	549	-56.955	1550.28	799	-57.401	1552.28
50	-58.434	1546.288	300	-56.174	1548.288	550	-56.965	1550.288	800	-57.391	1552.288
51	-58.425	1546.296	301	-56.178	1548.296	551	-56.971	1550.296	801	-57.385	1552.296
52	-58.418	1546.304	302	-56.174	1548.304	552	-56.976	1550.304	802	-57.378	1552.304
53	-58.408	1546.312	303	-56.169	1548.312	553	-56.983	1550.312	803	-57.376	1552.312
54	-58.4	1546.32	304	-56.159	1548.32	554	-56.989	1550.32	804	-57.369	1552.32
55	-58.394	1546.328	305	-56.167	1548.328	555	-56.988	1550.328	805	-57.356	1552.328
56	-58.386	1546.336	306	-56.167	1548.336	556	-56.993	1550.336	806	-57.35	1552.336
57	-58.378	1546.344	307	-56.164	1548.344	557	-57.003	1550.344	807	-57.344	1552.344
58	-58.363	1546.352	308	-56.157	1548.352	558	-57.014	1550.352	808	-57.332	1552.352
59	-58.349	1546.36	309	-56.157	1548.36	559	-57.02	1550.36	809	-57.325	1552.36
60	-58.343	1546.368	310	-56.159	1548.368	560	-57.022	1550.368	810	-57.317	1552.368
61	-58.333	1546.376	311	-56.156	1548.376	561	-57.026	1550.376	811	-57.313	1552.376
62	-58.328	1546.384	312	-56.156	1548.384	562	-57.036	1550.384	812	-57.308	1552.384
63	-58.319	1546.392	313	-56.159	1548.392	563	-57.044	1550.392	813	-57.298	1552.392
64	-58.31	1546.4	314	-56.157	1548.4	564	-57.048	1550.4	814	-57.293	1552.4
65	-58.291	1546.408	315	-56.153	1548.408	565	-57.051	1550.408	815	-57.281	1552.408
66	-58.277	1546.416	316	-56.154	1548.416	566	-57.057	1550.416	816	-57.274	1552.416
67	-58.258	1546.424	317	-56.153	1548.424	567	-57.061	1550.424	817	-57.271	1552.424
68	-58.244	1546.432	318	-56.149	1548.432	568	-57.067	1550.432	818	-57.264	1552.432
69	-58.233	1546.44	319	-56.148	1548.44	569	-57.074	1550.44	819	-57.246	1552.44
70	-58.219	1546.448	320	-56.149	1548.448	570	-57.08	1550.448	820	-57.239	1552.448
71	-58.212	1546.456	321	-56.15	1548.456	571	-57.083	1550.456	821	-57.233	1552.456
72	-58.198	1546.464	322	-56.151	1548.464	572	-57.087	1550.464	822	-57.22	1552.464
73	-58.195	1546.472	323	-56.148	1548.472	573	-57.089	1550.472	823	-57.215	1552.472
74	-58.183	1546.48	324	-56.144	1548.48	574	-57.092	1550.48	824	-57.205	1552.48
75	-58.167	1546.488	325	-56.141	1548.488	575	-57.096	1550.488	825	-57.196	1552.488
76	-58.165	1546.496	326	-56.137	1548.496	576	-57.097	1550.496	826	-57.188	1552.496
77	-58.162	1546.504	327	-56.135	1548.504	577	-57.102	1550.504	827	-57.179	1552.504
78	-58.155	1546.512	328	-56.137	1548.512	578	-57.101	1550.512	828	-57.179	1552.512
79	-58.141	1546.52	329	-56.133	1548.52	579	-57.104	1550.52	829	-57.167	1552.52
80	-58.135	1546.528	330	-56.127	1548.528	580	-57.105	1550.528	830	-57.165	1552.528
81	-58.132	1546.536	331	-56.121	1548.536	581	-57.106	1550.536	831	-57.162	1552.536
82	-58.127	1546.544	332	-56.115	1548.544	582	-57.105	1550.544	832	-57.154	1552.544
83	-58.117	1546.552	333	-56.107	1548.552	583	-57.104	1550.552	833	-57.145	1552.552
84	-58.112	1546.56	334	-56.108	1548.56	584	-57.105	1550.56	834	-57.136	1552.56
85	-58.106	1546.568	335	-56.104	1548.568	585	-57.102	1550.568	835	-57.131	1552.568
86	-58.1	1546.576	336	-56.093	1548.576	586	-57.106	1550.576	836	-57.12	1552.576
87	-58.1	1546.584	337	-56.091	1548.584	587	-57.11	1550.584	837	-57.12	1552.584
88	-58.101	1546.592	338	-56.081	1548.592	588	-57.115	1550.592	838	-57.114	1552.592
89	-58.096	1546.6	339	-56.076	1548.6	589	-57.114	1550.6	839	-57.108	1552.6
90	-58.088	1546.608	340	-56.07	1548.608	590	-57.121	1550.608	840	-57.103	1552.608
91	-58.08	1546.616	341	-56.069	1548.616	591	-57.125	1550.616	841	-57.099	1552.616
92	-58.075	1546.624	342	-56.069	1548.624	592	-57.12	1550.624	842	-57.097	1552.624
93	-58.059	1546.632	343	-56.064	1548.632	593	-57.119	1550.632	843	-57.095	1552.632
94	-58.044	1546.64	344	-56.059	1548.64	594	-57.121	1550.64	844	-57.09	1552.64
95	-58.028	1546.648	345	-56.059	1548.648	595	-57.124	1550.648	845	-57.08	1552.648
96	-58.016	1546.656	346	-56.054	1548.656	596	-57.129	1550.656	846	-57.077	1552.656
97	-58.003	1546.664	347	-56.054	1548.664	597	-57.128	1550.664	847	-57.072	1552.664
98	-57.986	1546.672	348	-56.051	1548.672	598	-57.129	1550.672	848	-57.07	1552.672
99	-57.972	1546.68	349	-56.05	1548.68	599	-57.127	1550.68	849	-57.068	1552.68
100	-57.955	1546.688	350	-56.048	1548.688	600	-57.129	1550.688	850	-57.065	1552.688
101	-57.938	1546.696	351	-56.048	1548.696	601	-57.126	1550.696	851	-57.058	1552.696
102	-57.93	1546.704	352	-56.046	1548.704	602	-57.129	1550.704	852	-57.052	1552.704
103	-57.918	1546.712	353	-56.039	1548.712	603	-57.132	1550.712	853	-57.052	1552.712
104	-57.907	1546.72	354	-56.042	1548.72	604	-57.133	1550.72	854	-57.054	1552.72
105	-57.9	1546.728	355	-56.044	1548.728	605	-57.137	1550.728	855	-57.051	1552.728
106	-57.89	1546.736	356	-56.032	1548.736	606	-57.143	1550.736	856	-57.048	1552.736
107	-57.881	1546.744	357	-56.033	1548.744	607	-57.14	1550.744	857	-57.043	1552.744
108	-57.878	1546.752	358	-56.033	1548.752	608	-57.14	1550.752	858	-57.04	1552.752
109	-57.877	1546.76	359	-56.039	1548.76	609	-57.142	1550.76	859	-57.033	1552.76
110	-57.873	1546.768	360	-56.045	1548.768	610	-57.142	1550.768	860	-57.026	1552.768
111	-57.87	1546.776	361	-56.043	1548.776	611	-57.145	1550.776	861	-57.026	1552.776
112	-57.861	1546.784	362	-56.039	1548.784	612	-57.145	1550.784	862	-57.029	1552.784
113	-57.853	1546.792	363	-56.039	1548.792	613	-57.146	1550.792	863	-57.024	1552.792
114	-57.844	1546.8	364	-56.042	1548.8	614	-57.148	1550.8	864	-57.021	1552.8
115	-57.835	1546.808	365	-56.042	1548.808	615	-57.151	1550.808	865	-57.024	1552.808
116	-57.818	1546.816	366	-56.05	1548.816	616	-57.144	1550.816	866	-57.021	1552.816
117	-57.814	1546.824	367	-56.05	1548.824	617	-57.138	1550.824	867	-57.018	1552.824
118	-57.801	1546.832	368	-56.045	1548.832	618	-57.143	1550.832	868	-57.012	1552.832
119	-57.793	1546.84	369	-56.05	1548.84	619	-57.143	1550.84	869	-57.008	1552.84
120	-57.784	1546.848	370	-56.056	1548.848	620	-57.148	1550.848	870	-57.009	1552.848
121	-57.767	1546.856	371	-56.066	1548.856	621	-57.145	1550.856	871	-57.006	1552.856
122	-57.755	1546.864	372	-56.069	1548.864	622	-57.14	1550.864	872	-57.003	1552.864
123	-57.751	1546.872	373	-56.07	1548.872	623	-57.145	1550.872	873	-57.001	1552.872

INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$
124	-57.732	1546.88	374	-56.078	1548.88	624	-57.15	1550.88	874	-57.002	1552.88
125	-57.721	1546.888	375	-56.078	1548.888	625	-57.151	1550.888	875	-57.002	1552.888
126	-57.704	1546.896	376	-56.076	1548.896	626	-57.149	1550.896	876	-57	1552.896
127	-57.697	1546.904	377	-56.085	1548.904	627	-57.146	1550.904	877	-56.999	1552.904
128	-57.694	1546.912	378	-56.086	1548.912	628	-57.148	1550.912	878	-56.994	1552.912
129	-57.685	1546.92	379	-56.095	1548.92	629	-57.149	1550.92	879	-56.988	1552.92
130	-57.68	1546.928	380	-56.095	1548.928	630	-57.153	1550.928	880	-56.987	1552.928
131	-57.67	1546.936	381	-56.095	1548.936	631	-57.154	1550.936	881	-56.981	1552.936
132	-57.659	1546.944	382	-56.103	1548.944	632	-57.155	1550.944	882	-56.985	1552.944
133	-57.65	1546.952	383	-56.102	1548.952	633	-57.157	1550.952	883	-56.989	1552.952
134	-57.64	1546.96	384	-56.106	1548.96	634	-57.16	1550.96	884	-56.99	1552.96
135	-57.635	1546.968	385	-56.106	1548.968	635	-57.16	1550.968	885	-56.994	1552.968
136	-57.631	1546.976	386	-56.112	1548.976	636	-57.162	1550.976	886	-56.992	1552.976
137	-57.623	1546.984	387	-56.114	1548.984	637	-57.161	1550.984	887	-56.993	1552.984
138	-57.616	1546.992	388	-56.113	1548.992	638	-57.158	1550.992	888	-56.996	1552.992
139	-57.606	1547	389	-56.117	1549	639	-57.16	1551	889	-56.999	1553
140	-57.597	1547.008	390	-56.124	1549.008	640	-57.165	1551.008	890	-56.999	1553.008
141	-57.587	1547.016	391	-56.133	1549.016	641	-57.175	1551.016	891	-57.002	1553.016
142	-57.581	1547.024	392	-56.133	1549.024	642	-57.172	1551.024	892	-57.004	1553.024
143	-57.569	1547.032	393	-56.136	1549.032	643	-57.177	1551.032	893	-57.008	1553.032
144	-57.559	1547.04	394	-56.134	1549.04	644	-57.182	1551.04	894	-57.009	1553.04
145	-57.553	1547.048	395	-56.144	1549.048	645	-57.186	1551.048	895	-57.012	1553.048
146	-57.545	1547.056	396	-56.149	1549.056	646	-57.19	1551.056	896	-57.019	1553.056
147	-57.533	1547.064	397	-56.156	1549.064	647	-57.198	1551.064	897	-57.025	1553.064
148	-57.521	1547.072	398	-56.162	1549.072	648	-57.203	1551.072	898	-57.035	1553.072
149	-57.501	1547.08	399	-56.171	1549.08	649	-57.204	1551.08	899	-57.041	1553.08
150	-57.492	1547.088	400	-56.177	1549.088	650	-57.215	1551.088	900	-57.042	1553.088
151	-57.473	1547.096	401	-56.184	1549.096	651	-57.218	1551.096	901	-57.053	1553.096
152	-57.461	1547.104	402	-56.192	1549.104	652	-57.226	1551.104	902	-57.062	1553.104
153	-57.459	1547.112	403	-56.203	1549.112	653	-57.228	1551.112	903	-57.066	1553.112
154	-57.446	1547.12	404	-56.208	1549.12	654	-57.23	1551.12	904	-57.071	1553.12
155	-57.437	1547.128	405	-56.211	1549.128	655	-57.24	1551.128	905	-57.082	1553.128
156	-57.425	1547.136	406	-56.214	1549.136	656	-57.247	1551.136	906	-57.094	1553.136
157	-57.418	1547.144	407	-56.226	1549.144	657	-57.251	1551.144	907	-57.102	1553.144
158	-57.415	1547.152	408	-56.235	1549.152	658	-57.259	1551.152	908	-57.11	1553.152
159	-57.409	1547.16	409	-56.242	1549.16	659	-57.263	1551.16	909	-57.117	1553.16
160	-57.404	1547.168	410	-56.262	1549.168	660	-57.261	1551.168	910	-57.129	1553.168
161	-57.4	1547.176	411	-56.262	1549.176	661	-57.269	1551.176	911	-57.139	1553.176
162	-57.396	1547.184	412	-56.265	1549.184	662	-57.276	1551.184	912	-57.148	1553.184
163	-57.385	1547.192	413	-56.278	1549.192	663	-57.283	1551.192	913	-57.155	1553.192
164	-57.385	1547.2	414	-56.28	1549.2	664	-57.289	1551.2	914	-57.165	1553.2
165	-57.381	1547.208	415	-56.298	1549.208	665	-57.296	1551.208	915	-57.175	1553.208
166	-57.366	1547.216	416	-56.301	1549.216	666	-57.311	1551.216	916	-57.182	1553.216
167	-57.36	1547.224	417	-56.31	1549.224	667	-57.323	1551.224	917	-57.195	1553.224
168	-57.35	1547.232	418	-56.316	1549.232	668	-57.325	1551.232	918	-57.201	1553.232
169	-57.348	1547.24	419	-56.326	1549.24	669	-57.326	1551.24	919	-57.217	1553.24
170	-57.341	1547.248	420	-56.334	1549.248	670	-57.338	1551.248	920	-57.228	1553.248
171	-57.33	1547.256	421	-56.336	1549.256	671	-57.352	1551.256	921	-57.236	1553.256
172	-57.323	1547.264	422	-56.338	1549.264	672	-57.358	1551.264	922	-57.242	1553.264
173	-57.312	1547.272	423	-56.348	1549.272	673	-57.363	1551.272	923	-57.245	1553.272
174	-57.3	1547.28	424	-56.347	1549.28	674	-57.37	1551.28	924	-57.258	1553.28
175	-57.293	1547.288	425	-56.358	1549.288	675	-57.378	1551.288	925	-57.266	1553.288
176	-57.284	1547.296	426	-56.363	1549.296	676	-57.389	1551.296	926	-57.276	1553.296
177	-57.278	1547.304	427	-56.37	1549.304	677	-57.387	1551.304	927	-57.289	1553.304
178	-57.263	1547.312	428	-56.371	1549.312	678	-57.393	1551.312	928	-57.299	1553.312
179	-57.249	1547.32	429	-56.369	1549.32	679	-57.399	1551.32	929	-57.307	1553.32
180	-57.243	1547.328	430	-56.372	1549.328	680	-57.41	1551.328	930	-57.317	1553.328
181	-57.241	1547.336	431	-56.377	1549.336	681	-57.415	1551.336	931	-57.318	1553.336
182	-57.24	1547.344	432	-56.384	1549.344	682	-57.422	1551.344	932	-57.321	1553.344
183	-57.241	1547.352	433	-56.396	1549.352	683	-57.425	1551.352	933	-57.33	1553.352
184	-57.232	1547.36	434	-56.401	1549.36	684	-57.433	1551.36	934	-57.34	1553.36
185	-57.227	1547.368	435	-56.413	1549.368	685	-57.442	1551.368	935	-57.347	1553.368
186	-57.222	1547.376	436	-56.418	1549.376	686	-57.444	1551.376	936	-57.353	1553.376
187	-57.214	1547.384	437	-56.413	1549.384	687	-57.453	1551.384	937	-57.361	1553.384
188	-57.205	1547.392	438	-56.423	1549.392	688	-57.465	1551.392	938	-57.362	1553.392
189	-57.191	1547.4	439	-56.436	1549.4	689	-57.473	1551.4	939	-57.371	1553.4
190	-57.181	1547.408	440	-56.439	1549.408	690	-57.476	1551.408	940	-57.378	1553.408
191	-57.173	1547.416	441	-56.442	1549.416	691	-57.481	1551.416	941	-57.382	1553.416
192	-57.16	1547.424	442	-56.448	1549.424	692	-57.486	1551.424	942	-57.39	1553.424
193	-57.147	1547.432	443	-56.447	1549.432	693	-57.499	1551.432	943	-57.393	1553.432
194	-57.132	1547.44	444	-56.455	1549.44	694	-57.5	1551.44	944	-57.4	1553.44
195	-57.118	1547.448	445	-56.459	1549.448	695	-57.51	1551.448	945	-57.403	1553.448
196	-57.103	1547.456	446	-56.463	1549.456	696	-57.508	1551.456	946	-57.404	1553.456
197	-57.094	1547.464	447	-56.462	1549.464	697	-57.51	1551.464	947	-57.408	1553.464
198	-57.077	1547.472	448	-56.471	1549.472	698	-57.519	1551.472	948	-57.412	1553.472
199	-57.059	1547.48	449	-56.48	1549.48	699	-57.528	1551.48	949	-57.419	1553.48
200	-57.052	1547.488	450	-56.484	1549.488	700	-57.531	1551.488	950	-57.424	1553.488

INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$
201	-57.042	1547.496	451	-56.486	1549.496	701	-57.539	1551.496	951	-57.425	1553.496
202	-57.03	1547.504	452	-56.491	1549.504	702	-57.546	1551.504	952	-57.432	1553.504
203	-57.02	1547.512	453	-56.497	1549.512	703	-57.547	1551.512	953	-57.437	1553.512
204	-57.01	1547.52	454	-56.503	1549.52	704	-57.552	1551.52	954	-57.433	1553.52
205	-57.003	1547.528	455	-56.505	1549.528	705	-57.556	1551.528	955	-57.437	1553.528
206	-57	1547.536	456	-56.506	1549.536	706	-57.558	1551.536	956	-57.447	1553.536
207	-56.991	1547.544	457	-56.513	1549.544	707	-57.57	1551.544	957	-57.451	1553.544
208	-56.987	1547.552	458	-56.518	1549.552	708	-57.576	1551.552	958	-57.451	1553.552
209	-56.979	1547.56	459	-56.524	1549.56	709	-57.577	1551.56	959	-57.45	1553.56
210	-56.972	1547.568	460	-56.532	1549.568	710	-57.578	1551.568	960	-57.452	1553.568
211	-56.971	1547.576	461	-56.535	1549.576	711	-57.582	1551.576	961	-57.458	1553.576
212	-56.964	1547.584	462	-56.537	1549.584	712	-57.59	1551.584	962	-57.461	1553.584
213	-56.958	1547.592	463	-56.546	1549.592	713	-57.591	1551.592	963	-57.456	1553.592
214	-56.954	1547.6	464	-56.555	1549.6	714	-57.591	1551.6	964	-57.455	1553.6
215	-56.949	1547.608	465	-56.563	1549.608	715	-57.597	1551.608	965	-57.462	1553.608
216	-56.931	1547.616	466	-56.565	1549.616	716	-57.6	1551.616	966	-57.464	1553.616
217	-56.921	1547.624	467	-56.569	1549.624	717	-57.602	1551.624	967	-57.463	1553.624
218	-56.909	1547.632	468	-56.58	1549.632	718	-57.607	1551.632	968	-57.464	1553.632
219	-56.898	1547.64	469	-56.589	1549.64	719	-57.607	1551.64	969	-57.467	1553.64
220	-56.885	1547.648	470	-56.59	1549.648	720	-57.607	1551.648	970	-57.469	1553.648
221	-56.868	1547.656	471	-56.598	1549.656	721	-57.606	1551.656	971	-57.469	1553.656
222	-56.852	1547.664	472	-56.604	1549.664	722	-57.605	1551.664	972	-57.47	1553.664
223	-56.84	1547.672	473	-56.615	1549.672	723	-57.612	1551.672	973	-57.473	1553.672
224	-56.83	1547.68	474	-56.638	1549.68	724	-57.619	1551.68	974	-57.476	1553.68
225	-56.821	1547.688	475	-56.658	1549.688	725	-57.621	1551.688	975	-57.476	1553.688
226	-56.807	1547.696	476	-56.693	1549.696	726	-57.618	1551.696	976	-57.471	1553.696
227	-56.795	1547.704	477	-56.735	1549.704	727	-57.617	1551.704	977	-57.473	1553.704
228	-56.787	1547.712	478	-56.788	1549.712	728	-57.621	1551.712	978	-57.48	1553.712
229	-56.767	1547.72	479	-56.875	1549.72	729	-57.62	1551.72	979	-57.485	1553.72
230	-56.754	1547.728	480	-56.985	1549.728	730	-57.619	1551.728	980	-57.48	1553.728
231	-56.745	1547.736	481	-57.111	1549.736	731	-57.621	1551.736	981	-57.48	1553.736
232	-56.733	1547.744	482	-57.296	1549.744	732	-57.627	1551.744	982	-57.482	1553.744
233	-56.72	1547.752	483	-57.48	1549.752	733	-57.633	1551.752	983	-57.491	1553.752
234	-56.709	1547.76	484	-57.694	1549.76	734	-57.633	1551.76	984	-57.491	1553.76
235	-56.692	1547.768	485	-58.003	1549.768	735	-57.633	1551.768	985	-57.488	1553.768
236	-56.679	1547.776	486	-58.37	1549.776	736	-57.634	1551.776	986	-57.49	1553.776
237	-56.677	1547.784	487	-58.86	1549.784	737	-57.636	1551.784	987	-57.489	1553.784
238	-56.667	1547.792	488	-59.274	1549.792	738	-57.63	1551.792	988	-57.494	1553.792
239	-56.653	1547.8	489	-59.764	1549.8	739	-57.627	1551.8	989	-57.5	1553.8
240	-56.635	1547.808	490	-60.379	1549.808	740	-57.633	1551.808	990	-57.501	1553.808
241	-56.631	1547.816	491	-60.929	1549.816	741	-57.628	1551.816	991	-57.506	1553.816
242	-56.624	1547.824	492	-61.436	1549.824	742	-57.633	1551.824	992	-57.505	1553.824
243	-56.619	1547.832	493	-61.968	1549.832	743	-57.636	1551.832	993	-57.508	1553.832
244	-56.612	1547.84	494	-62.461	1549.84	744	-57.631	1551.84	994	-57.505	1553.84
245	-56.606	1547.848	495	-62.945	1549.848	745	-57.629	1551.848	995	-57.501	1553.848
246	-56.603	1547.856	496	-63.319	1549.856	746	-57.63	1551.856	996	-57.506	1553.856
247	-56.597	1547.864	497	-63.626	1549.864	747	-57.637	1551.864	997	-57.51	1553.864
248	-56.582	1547.872	498	-63.956	1549.872	748	-57.637	1551.872	998	-57.505	1553.872
249	-56.571	1547.88	499	-64.131	1549.88	749	-57.632	1551.88	999	-57.505	1553.88
250	-56.566	1547.888	500	-64.231	1549.888	750	-57.63	1551.888	1000	-57.503	1553.888
									1001	-57.503	1553.896

TYPE	TRACE
DATE & TIME	11Apr2015 09:18PM EDT
INSTRUMENT	86142B
AIR/VACUUM/STP	VACUUM
TRACE	A
START	1545.936
STOP	1553.936
HORIZONTAL SCALE	nm
LENGTH (pts)	1001
RBW (nm)	0.1
VBW (Hz)	194
REFERENCE LEVEL (dBm)	-58
VERTICAL SCALE	dBm
SENSITIVITY (dBm)	-82.34
AVERAGING	OFF
MIN	OFF
MAX	OFF
SMOOTHING	OFF
TRACE MATH	OFF
OFFSET (dB)	0
MARKER	1
MARKER TRACE	A
MARKER X POSITION	1549.936
MARKER AMPLITUDE	-64.305
MARKER UNITS	dBm

A

SN DE44103305 REV B.06.02

Temp

45

0.008

INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$
1	-55.877	1545.936	251	-56.901	1547.936	501	-64.305	1549.936	751	-57.576	1551.936
2	-55.878	1545.944	252	-56.906	1547.944	502	-64.197	1549.944	752	-57.582	1551.944
3	-55.875	1545.952	253	-56.904	1547.952	503	-64.026	1549.952	753	-57.583	1551.952
4	-55.874	1545.96	254	-56.904	1547.96	504	-63.746	1549.96	754	-57.597	1551.96
5	-55.878	1545.968	255	-56.904	1547.968	505	-63.425	1549.968	755	-57.598	1551.968
6	-55.876	1545.976	256	-56.907	1547.976	506	-63.016	1549.976	756	-57.6	1551.976
7	-55.883	1545.984	257	-56.908	1547.984	507	-62.603	1549.984	757	-57.604	1551.984
8	-55.888	1545.992	258	-56.899	1547.992	508	-62.163	1549.992	758	-57.607	1551.992
9	-55.888	1546	259	-56.899	1548	509	-61.601	1550	759	-57.611	1552
10	-55.892	1546.008	260	-56.895	1548.008	510	-61.147	1550.008	760	-57.611	1552.008
11	-55.898	1546.016	261	-56.89	1548.016	511	-60.724	1550.016	761	-57.617	1552.016
12	-55.906	1546.024	262	-56.881	1548.024	512	-60.199	1550.024	762	-57.617	1552.024
13	-55.909	1546.032	263	-56.885	1548.032	513	-59.759	1550.032	763	-57.621	1552.032
14	-55.914	1546.04	264	-56.885	1548.04	514	-59.328	1550.04	764	-57.622	1552.04
15	-55.918	1546.048	265	-56.887	1548.048	515	-58.992	1550.048	765	-57.63	1552.048
16	-55.921	1546.056	266	-56.88	1548.056	516	-58.67	1550.056	766	-57.633	1552.056
17	-55.925	1546.064	267	-56.881	1548.064	517	-58.321	1550.064	767	-57.637	1552.064
18	-55.927	1546.072	268	-56.878	1548.072	518	-57.97	1550.072	768	-57.64	1552.072
19	-55.929	1546.08	269	-56.875	1548.08	519	-57.79	1550.08	769	-57.637	1552.08
20	-55.93	1546.088	270	-56.871	1548.088	520	-57.601	1550.088	770	-57.64	1552.088
21	-55.931	1546.096	271	-56.874	1548.096	521	-57.435	1550.096	771	-57.653	1552.096
22	-55.929	1546.104	272	-56.876	1548.104	522	-57.263	1550.104	772	-57.66	1552.104
23	-55.932	1546.112	273	-56.878	1548.112	523	-57.164	1550.112	773	-57.657	1552.112
24	-55.929	1546.12	274	-56.873	1548.12	524	-57.072	1550.12	774	-57.656	1552.12
25	-55.93	1546.128	275	-56.877	1548.128	525	-56.994	1550.128	775	-57.657	1552.128
26	-55.931	1546.136	276	-56.878	1548.136	526	-56.95	1550.136	776	-57.669	1552.136
27	-55.931	1546.144	277	-56.879	1548.144	527	-56.92	1550.144	777	-57.673	1552.144
28	-55.928	1546.152	278	-56.878	1548.152	528	-56.885	1550.152	778	-57.681	1552.152
29	-55.927	1546.16	279	-56.867	1548.16	529	-56.867	1550.16	779	-57.689	1552.16
30	-55.925	1546.168	280	-56.868	1548.168	530	-56.858	1550.168	780	-57.694	1552.168
31	-55.924	1546.176	281	-56.866	1548.176	531	-56.854	1550.176	781	-57.694	1552.176
32	-55.923	1546.184	282	-56.869	1548.184	532	-56.849	1550.184	782	-57.692	1552.184
33	-55.916	1546.192	283	-56.875	1548.192	533	-56.845	1550.192	783	-57.694	1552.192
34	-55.914	1546.2	284	-56.871	1548.2	534	-56.849	1550.2	784	-57.704	1552.2
35	-55.912	1546.208	285	-56.869	1548.208	535	-56.847	1550.208	785	-57.703	1552.208
36	-55.913	1546.216	286	-56.87	1548.216	536	-56.846	1550.216	786	-57.707	1552.216
37	-55.917	1546.224	287	-56.869	1548.224	537	-56.842	1550.224	787	-57.716	1552.224
38	-55.916	1546.232	288	-56.866	1548.232	538	-56.836	1550.232	788	-57.72	1552.232
39	-55.908	1546.24	289	-56.867	1548.24	539	-56.832	1550.24	789	-57.724	1552.24
40	-55.909	1546.248	290	-56.862	1548.248	540	-56.832	1550.248	790	-57.726	1552.248
41	-55.907	1546.256	291	-56.856	1548.256	541	-56.831	1550.256	791	-57.726	1552.256

42	-55.91	1546.264	292	-56.85	1548.264	542	-56.83	1550.264	792	-57.725	1552.264
43	-55.914	1546.272	293	-56.845	1548.272	543	-56.82	1550.272	793	-57.731	1552.272
44	-55.925	1546.28	294	-56.841	1548.28	544	-56.818	1550.28	794	-57.733	1552.28
45	-55.931	1546.288	295	-56.842	1548.288	545	-56.818	1550.288	795	-57.738	1552.288
46	-55.932	1546.296	296	-56.843	1548.296	546	-56.81	1550.296	796	-57.747	1552.296
47	-55.936	1546.304	297	-56.84	1548.304	547	-56.8	1550.304	797	-57.748	1552.304
48	-55.933	1546.312	298	-56.839	1548.312	548	-56.799	1550.312	798	-57.751	1552.312
49	-55.943	1546.32	299	-56.84	1548.32	549	-56.798	1550.32	799	-57.759	1552.32
50	-55.945	1546.328	300	-56.835	1548.328	550	-56.793	1550.328	800	-57.763	1552.328
51	-55.952	1546.336	301	-56.832	1548.336	551	-56.79	1550.336	801	-57.769	1552.336
52	-55.958	1546.344	302	-56.827	1548.344	552	-56.786	1550.344	802	-57.768	1552.344
53	-55.965	1546.352	303	-56.829	1548.352	553	-56.778	1550.352	803	-57.769	1552.352
54	-55.978	1546.36	304	-56.828	1548.36	554	-56.773	1550.36	804	-57.78	1552.36
55	-55.99	1546.368	305	-56.825	1548.368	555	-56.771	1550.368	805	-57.786	1552.368
56	-55.995	1546.376	306	-56.822	1548.376	556	-56.774	1550.376	806	-57.791	1552.376
57	-56	1546.384	307	-56.826	1548.384	557	-56.77	1550.384	807	-57.796	1552.384
58	-56.007	1546.392	308	-56.827	1548.392	558	-56.762	1550.392	808	-57.801	1552.392
59	-56.014	1546.4	309	-56.822	1548.4	559	-56.758	1550.4	809	-57.802	1552.4
60	-56.013	1546.408	310	-56.82	1548.408	560	-56.754	1550.408	810	-57.809	1552.408
61	-56.012	1546.416	311	-56.822	1548.416	561	-56.743	1550.416	811	-57.816	1552.416
62	-56.013	1546.424	312	-56.824	1548.424	562	-56.741	1550.424	812	-57.828	1552.424
63	-56.019	1546.432	313	-56.826	1548.432	563	-56.74	1550.432	813	-57.834	1552.432
64	-56.021	1546.44	314	-56.834	1548.44	564	-56.738	1550.44	814	-57.843	1552.44
65	-56.02	1546.448	315	-56.836	1548.448	565	-56.73	1550.448	815	-57.852	1552.448
66	-56.017	1546.456	316	-56.833	1548.456	566	-56.73	1550.456	816	-57.855	1552.456
67	-56.011	1546.464	317	-56.828	1548.464	567	-56.726	1550.464	817	-57.863	1552.464
68	-56.011	1546.472	318	-56.827	1548.472	568	-56.714	1550.472	818	-57.868	1552.472
69	-56.015	1546.48	319	-56.824	1548.48	569	-56.711	1550.48	819	-57.87	1552.48
70	-56.016	1546.488	320	-56.824	1548.488	570	-56.705	1550.488	820	-57.877	1552.488
71	-56.02	1546.496	321	-56.822	1548.496	571	-56.706	1550.496	821	-57.883	1552.496
72	-56.023	1546.504	322	-56.823	1548.504	572	-56.703	1550.504	822	-57.89	1552.504
73	-56.032	1546.512	323	-56.821	1548.512	573	-56.697	1550.512	823	-57.91	1552.512
74	-56.035	1546.52	324	-56.819	1548.52	574	-56.694	1550.52	824	-57.921	1552.52
75	-56.044	1546.528	325	-56.815	1548.528	575	-56.689	1550.528	825	-57.924	1552.528
76	-56.058	1546.536	326	-56.806	1548.536	576	-56.684	1550.536	826	-57.927	1552.536
77	-56.069	1546.544	327	-56.8	1548.544	577	-56.678	1550.544	827	-57.934	1552.544
78	-56.075	1546.552	328	-56.791	1548.552	578	-56.678	1550.552	828	-57.931	1552.552
79	-56.083	1546.56	329	-56.78	1548.56	579	-56.675	1550.56	829	-57.935	1552.56
80	-56.091	1546.568	330	-56.78	1548.568	580	-56.669	1550.568	830	-57.939	1552.568
81	-56.108	1546.576	331	-56.768	1548.576	581	-56.667	1550.576	831	-57.946	1552.576
82	-56.13	1546.584	332	-56.758	1548.584	582	-56.662	1550.584	832	-57.954	1552.584
83	-56.147	1546.592	333	-56.748	1548.592	583	-56.643	1550.592	833	-57.967	1552.592
84	-56.162	1546.6	334	-56.74	1548.6	584	-56.655	1550.6	834	-57.972	1552.6
85	-56.179	1546.608	335	-56.728	1548.608	585	-56.66	1550.608	835	-57.977	1552.608
86	-56.188	1546.616	336	-56.722	1548.616	586	-56.653	1550.616	836	-57.983	1552.616
87	-56.195	1546.624	337	-56.718	1548.624	587	-56.645	1550.624	837	-57.987	1552.624
88	-56.208	1546.632	338	-56.708	1548.632	588	-56.643	1550.632	838	-57.992	1552.632
89	-56.21	1546.64	339	-56.696	1548.64	589	-56.637	1550.64	839	-58.002	1552.64
90	-56.209	1546.648	340	-56.692	1548.648	590	-56.635	1550.648	840	-58.007	1552.648
91	-56.211	1546.656	341	-56.666	1548.656	591	-56.631	1550.656	841	-58.017	1552.656
92	-56.209	1546.664	342	-56.659	1548.664	592	-56.635	1550.664	842	-58.027	1552.664
93	-56.207	1546.672	343	-56.65	1548.672	593	-56.635	1550.672	843	-58.029	1552.672
94	-56.203	1546.68	344	-56.646	1548.68	594	-56.636	1550.68	844	-58.031	1552.68
95	-56.199	1546.688	345	-56.638	1548.688	595	-56.636	1550.688	845	-58.033	1552.688
96	-56.194	1546.696	346	-56.637	1548.696	596	-56.634	1550.696	846	-58.035	1552.696
97	-56.195	1546.704	347	-56.629	1548.704	597	-56.633	1550.704	847	-58.04	1552.704
98	-56.19	1546.712	348	-56.622	1548.712	598	-56.635	1550.712	848	-58.047	1552.712
99	-56.191	1546.72	349	-56.615	1548.72	599	-56.653	1550.72	849	-58.052	1552.72
100	-56.195	1546.728	350	-56.608	1548.728	600	-56.662	1550.728	850	-58.06	1552.728
101	-56.195	1546.736	351	-56.607	1548.736	601	-56.654	1550.736	851	-58.067	1552.736
102	-56.194	1546.744	352	-56.596	1548.744	602	-56.654	1550.744	852	-58.068	1552.744
103	-56.193	1546.752	353	-56.596	1548.752	603	-56.654	1550.752	853	-58.071	1552.752
104	-56.193	1546.76	354	-56.589	1548.76	604	-56.651	1550.76	854	-58.066	1552.76
105	-56.199	1546.768	355	-56.577	1548.768	605	-56.652	1550.768	855	-58.069	1552.768
106	-56.21	1546.776	356	-56.572	1548.776	606	-56.637	1550.776	856	-58.07	1552.776
107	-56.213	1546.784	357	-56.576	1548.784	607	-56.656	1550.784	857	-58.075	1552.784
108	-56.21	1546.792	358	-56.571	1548.792	608	-56.668	1550.792	858	-58.078	1552.792
109	-56.221	1546.8	359	-56.56	1548.8	609	-56.671	1550.8	859	-58.079	1552.8
110	-56.235	1546.808	360	-56.555	1548.808	610	-56.669	1550.808	860	-58.078	1552.808
111	-56.241	1546.816	361	-56.562	1548.816	611	-56.672	1550.816	861	-58.083	1552.816
112	-56.254	1546.824	362	-56.558	1548.824	612	-56.676	1550.824	862	-58.093	1552.824
113	-56.255	1546.832	363	-56.547	1548.832	613	-56.685	1550.832	863	-58.098	1552.832
114	-56.262	1546.84	364	-56.549	1548.84	614	-56.684	1550.84	864	-58.094	1552.84

115	-56.266	1546.848	365	-56.55	1548.848	615	-56.688	1550.848	865	-58.098	1552.848
116	-56.264	1546.856	366	-56.543	1548.856	616	-56.692	1550.856	866	-58.108	1552.856
117	-56.272	1546.864	367	-56.543	1548.864	617	-56.701	1550.864	867	-58.114	1552.864
118	-56.28	1546.872	368	-56.542	1548.872	618	-56.706	1550.872	868	-58.113	1552.872
119	-56.281	1546.88	369	-56.534	1548.88	619	-56.717	1550.88	869	-58.113	1552.88
120	-56.288	1546.888	370	-56.531	1548.888	620	-56.721	1550.888	870	-58.118	1552.888
121	-56.292	1546.896	371	-56.525	1548.896	621	-56.725	1550.896	871	-58.122	1552.896
122	-56.295	1546.904	372	-56.528	1548.904	622	-56.725	1550.904	872	-58.115	1552.904
123	-56.294	1546.912	373	-56.531	1548.912	623	-56.733	1550.912	873	-58.112	1552.912
124	-56.3	1546.92	374	-56.525	1548.92	624	-56.733	1550.92	874	-58.111	1552.92
125	-56.308	1546.928	375	-56.528	1548.928	625	-56.733	1550.928	875	-58.115	1552.928
126	-56.308	1546.936	376	-56.524	1548.936	626	-56.741	1550.936	876	-58.124	1552.936
127	-56.315	1546.944	377	-56.52	1548.944	627	-56.752	1550.944	877	-58.133	1552.944
128	-56.315	1546.952	378	-56.519	1548.952	628	-56.76	1550.952	878	-58.137	1552.952
129	-56.325	1546.96	379	-56.522	1548.96	629	-56.767	1550.96	879	-58.139	1552.96
130	-56.336	1546.968	380	-56.518	1548.968	630	-56.772	1550.968	880	-58.142	1552.968
131	-56.341	1546.976	381	-56.512	1548.976	631	-56.791	1550.976	881	-58.149	1552.976
132	-56.354	1546.984	382	-56.514	1548.984	632	-56.792	1550.984	882	-58.152	1552.984
133	-56.362	1546.992	383	-56.508	1548.992	633	-56.797	1550.992	883	-58.149	1552.992
134	-56.374	1547	384	-56.512	1549	634	-56.803	1551	884	-58.155	1553
135	-56.384	1547.008	385	-56.509	1549.008	635	-56.809	1551.008	885	-58.159	1553.008
136	-56.395	1547.016	386	-56.504	1549.016	636	-56.82	1551.016	886	-58.164	1553.016
137	-56.402	1547.024	387	-56.509	1549.024	637	-56.832	1551.024	887	-58.172	1553.024
138	-56.406	1547.032	388	-56.502	1549.032	638	-56.838	1551.032	888	-58.185	1553.032
139	-56.415	1547.04	389	-56.507	1549.04	639	-56.852	1551.04	889	-58.2	1553.04
140	-56.427	1547.048	390	-56.503	1549.048	640	-56.865	1551.048	890	-58.2	1553.048
141	-56.439	1547.056	391	-56.502	1549.056	641	-56.872	1551.056	891	-58.204	1553.056
142	-56.43	1547.064	392	-56.499	1549.064	642	-56.883	1551.064	892	-58.216	1553.064
143	-56.43	1547.072	393	-56.505	1549.072	643	-56.888	1551.072	893	-58.221	1553.072
144	-56.433	1547.08	394	-56.506	1549.08	644	-56.897	1551.08	894	-58.226	1553.08
145	-56.428	1547.088	395	-56.507	1549.088	645	-56.912	1551.088	895	-58.228	1553.088
146	-56.427	1547.096	396	-56.508	1549.096	646	-56.924	1551.096	896	-58.233	1553.096
147	-56.427	1547.104	397	-56.504	1549.104	647	-56.938	1551.104	897	-58.241	1553.104
148	-56.428	1547.112	398	-56.509	1549.112	648	-56.949	1551.112	898	-58.255	1553.112
149	-56.429	1547.12	399	-56.511	1549.12	649	-56.954	1551.12	899	-58.272	1553.12
150	-56.433	1547.128	400	-56.513	1549.128	650	-56.966	1551.128	900	-58.276	1553.128
151	-56.429	1547.136	401	-56.514	1549.136	651	-56.981	1551.136	901	-58.277	1553.136
152	-56.423	1547.144	402	-56.518	1549.144	652	-56.99	1551.144	902	-58.288	1553.144
153	-56.425	1547.152	403	-56.528	1549.152	653	-57.001	1551.152	903	-58.296	1553.152
154	-56.436	1547.16	404	-56.534	1549.16	654	-57.011	1551.16	904	-58.309	1553.16
155	-56.442	1547.168	405	-56.534	1549.168	655	-57.025	1551.168	905	-58.32	1553.168
156	-56.455	1547.176	406	-56.539	1549.176	656	-57.033	1551.176	906	-58.333	1553.176
157	-56.457	1547.184	407	-56.541	1549.184	657	-57.041	1551.184	907	-58.34	1553.184
158	-56.468	1547.192	408	-56.545	1549.192	658	-57.053	1551.192	908	-58.337	1553.192
159	-56.479	1547.2	409	-56.552	1549.2	659	-57.073	1551.2	909	-58.341	1553.2
160	-56.482	1547.208	410	-56.552	1549.208	660	-57.084	1551.208	910	-58.35	1553.208
161	-56.483	1547.216	411	-56.565	1549.216	661	-57.09	1551.216	911	-58.362	1553.216
162	-56.491	1547.224	412	-56.566	1549.224	662	-57.101	1551.224	912	-58.37	1553.224
163	-56.497	1547.232	413	-56.568	1549.232	663	-57.117	1551.232	913	-58.39	1553.232
164	-56.498	1547.24	414	-56.571	1549.24	664	-57.132	1551.24	914	-58.401	1553.24
165	-56.499	1547.248	415	-56.579	1549.248	665	-57.137	1551.248	915	-58.403	1553.248
166	-56.507	1547.256	416	-56.583	1549.256	666	-57.146	1551.256	916	-58.406	1553.256
167	-56.511	1547.264	417	-56.591	1549.264	667	-57.157	1551.264	917	-58.413	1553.264
168	-56.514	1547.272	418	-56.582	1549.272	668	-57.171	1551.272	918	-58.426	1553.272
169	-56.515	1547.28	419	-56.589	1549.28	669	-57.191	1551.28	919	-58.437	1553.28
170	-56.516	1547.288	420	-56.591	1549.288	670	-57.195	1551.288	920	-58.446	1553.288
171	-56.519	1547.296	421	-56.597	1549.296	671	-57.21	1551.296	921	-58.46	1553.296
172	-56.526	1547.304	422	-56.598	1549.304	672	-57.223	1551.304	922	-58.466	1553.304
173	-56.527	1547.312	423	-56.606	1549.312	673	-57.23	1551.312	923	-58.468	1553.312
174	-56.531	1547.32	424	-56.608	1549.32	674	-57.24	1551.32	924	-58.474	1553.32
175	-56.53	1547.328	425	-56.611	1549.328	675	-57.254	1551.328	925	-58.483	1553.328
176	-56.531	1547.336	426	-56.619	1549.336	676	-57.264	1551.336	926	-58.495	1553.336
177	-56.533	1547.344	427	-56.618	1549.344	677	-57.277	1551.344	927	-58.507	1553.344
178	-56.535	1547.352	428	-56.627	1549.352	678	-57.28	1551.352	928	-58.506	1553.352
179	-56.54	1547.36	429	-56.635	1549.36	679	-57.296	1551.36	929	-58.504	1553.36
180	-56.539	1547.368	430	-56.64	1549.368	680	-57.307	1551.368	930	-58.51	1553.368
181	-56.544	1547.376	431	-56.645	1549.376	681	-57.314	1551.376	931	-58.523	1553.376
182	-56.548	1547.384	432	-56.64	1549.384	682	-57.326	1551.384	932	-58.527	1553.384
183	-56.551	1547.392	433	-56.646	1549.392	683	-57.339	1551.392	933	-58.533	1553.392
184	-56.557	1547.4	434	-56.648	1549.4	684	-57.348	1551.4	934	-58.546	1553.4
185	-56.559	1547.408	435	-56.652	1549.408	685	-57.361	1551.408	935	-58.544	1553.408
186	-56.566	1547.416	436	-56.651	1549.416	686	-57.369	1551.416	936	-58.553	1553.416
187	-56.567	1547.424	437	-56.668	1549.424	687	-57.373	1551.424	937	-58.564	1553.424

188	-56.566	1547.432	438	-56.681	1549.432	688	-57.384	1551.432	938	-58.567	1553.432
189	-56.568	1547.44	439	-56.687	1549.44	689	-57.393	1551.44	939	-58.572	1553.44
190	-56.574	1547.448	440	-56.691	1549.448	690	-57.399	1551.448	940	-58.575	1553.448
191	-56.569	1547.456	441	-56.695	1549.456	691	-57.401	1551.456	941	-58.585	1553.456
192	-56.565	1547.464	442	-56.701	1549.464	692	-57.405	1551.464	942	-58.596	1553.464
193	-56.575	1547.472	443	-56.702	1549.472	693	-57.409	1551.472	943	-58.597	1553.472
194	-56.574	1547.48	444	-56.705	1549.48	694	-57.41	1551.48	944	-58.612	1553.48
195	-56.58	1547.488	445	-56.713	1549.488	695	-57.415	1551.488	945	-58.619	1553.488
196	-56.583	1547.496	446	-56.715	1549.496	696	-57.421	1551.496	946	-58.629	1553.496
197	-56.584	1547.504	447	-56.723	1549.504	697	-57.432	1551.504	947	-58.639	1553.504
198	-56.587	1547.512	448	-56.726	1549.512	698	-57.44	1551.512	948	-58.653	1553.512
199	-56.588	1547.52	449	-56.724	1549.52	699	-57.447	1551.52	949	-58.661	1553.52
200	-56.599	1547.528	450	-56.729	1549.528	700	-57.448	1551.528	950	-58.669	1553.528
201	-56.593	1547.536	451	-56.733	1549.536	701	-57.447	1551.536	951	-58.674	1553.536
202	-56.605	1547.544	452	-56.738	1549.544	702	-57.453	1551.544	952	-58.686	1553.544
203	-56.612	1547.552	453	-56.735	1549.552	703	-57.467	1551.552	953	-58.692	1553.552
204	-56.619	1547.56	454	-56.743	1549.56	704	-57.476	1551.56	954	-58.699	1553.56
205	-56.625	1547.568	455	-56.748	1549.568	705	-57.483	1551.568	955	-58.716	1553.568
206	-56.631	1547.576	456	-56.754	1549.576	706	-57.487	1551.576	956	-58.728	1553.576
207	-56.648	1547.584	457	-56.755	1549.584	707	-57.485	1551.584	957	-58.736	1553.584
208	-56.654	1547.592	458	-56.754	1549.592	708	-57.485	1551.592	958	-58.748	1553.592
209	-56.662	1547.6	459	-56.762	1549.6	709	-57.483	1551.6	959	-58.756	1553.6
210	-56.67	1547.608	460	-56.761	1549.608	710	-57.486	1551.608	960	-58.769	1553.608
211	-56.684	1547.616	461	-56.765	1549.616	711	-57.486	1551.616	961	-58.77	1553.616
212	-56.708	1547.624	462	-56.771	1549.624	712	-57.489	1551.624	962	-58.781	1553.624
213	-56.715	1547.632	463	-56.777	1549.632	713	-57.499	1551.632	963	-58.796	1553.632
214	-56.726	1547.64	464	-56.776	1549.64	714	-57.504	1551.64	964	-58.803	1553.64
215	-56.732	1547.648	465	-56.777	1549.648	715	-57.506	1551.648	965	-58.81	1553.648
216	-56.739	1547.656	466	-56.781	1549.656	716	-57.509	1551.656	966	-58.812	1553.656
217	-56.741	1547.664	467	-56.783	1549.664	717	-57.505	1551.664	967	-58.814	1553.664
218	-56.748	1547.672	468	-56.791	1549.672	718	-57.505	1551.672	968	-58.819	1553.672
219	-56.76	1547.68	469	-56.794	1549.68	719	-57.511	1551.68	969	-58.833	1553.68
220	-56.764	1547.688	470	-56.798	1549.688	720	-57.514	1551.688	970	-58.849	1553.688
221	-56.764	1547.696	471	-56.804	1549.696	721	-57.514	1551.696	971	-58.866	1553.696
222	-56.77	1547.704	472	-56.809	1549.704	722	-57.515	1551.704	972	-58.873	1553.704
223	-56.778	1547.712	473	-56.818	1549.712	723	-57.515	1551.712	973	-58.873	1553.712
224	-56.78	1547.72	474	-56.828	1549.72	724	-57.516	1551.72	974	-58.874	1553.72
225	-56.791	1547.728	475	-56.843	1549.728	725	-57.516	1551.728	975	-58.88	1553.728
226	-56.8	1547.736	476	-56.865	1549.736	726	-57.519	1551.736	976	-58.889	1553.736
227	-56.801	1547.744	477	-56.894	1549.744	727	-57.519	1551.744	977	-58.896	1553.744
228	-56.806	1547.752	478	-56.941	1549.752	728	-57.526	1551.752	978	-58.902	1553.752
229	-56.808	1547.76	479	-57.017	1549.76	729	-57.525	1551.76	979	-58.912	1553.76
230	-56.815	1547.768	480	-57.098	1549.768	730	-57.518	1551.768	980	-58.926	1553.768
231	-56.82	1547.776	481	-57.211	1549.776	731	-57.519	1551.776	981	-58.932	1553.776
232	-56.827	1547.784	482	-57.385	1549.784	732	-57.528	1551.784	982	-58.94	1553.784
233	-56.839	1547.792	483	-57.566	1549.792	733	-57.528	1551.792	983	-58.952	1553.792
234	-56.839	1547.8	484	-57.806	1549.8	734	-57.533	1551.8	984	-58.95	1553.8
235	-56.84	1547.808	485	-58.1	1549.808	735	-57.532	1551.808	985	-58.956	1553.808
236	-56.84	1547.816	486	-58.42	1549.816	736	-57.538	1551.816	986	-58.962	1553.816
237	-56.842	1547.824	487	-58.836	1549.824	737	-57.542	1551.824	987	-58.962	1553.824
238	-56.845	1547.832	488	-59.338	1549.832	738	-57.541	1551.832	988	-58.971	1553.832
239	-56.848	1547.84	489	-59.758	1549.84	739	-57.543	1551.84	989	-58.983	1553.84
240	-56.848	1547.848	490	-60.29	1549.848	740	-57.551	1551.848	990	-58.992	1553.848
241	-56.848	1547.856	491	-60.783	1549.856	741	-57.551	1551.856	991	-58.996	1553.856
242	-56.852	1547.864	492	-61.331	1549.864	742	-57.551	1551.864	992	-59.01	1553.864
243	-56.86	1547.872	493	-61.971	1549.872	743	-57.551	1551.872	993	-59.009	1553.872
244	-56.866	1547.88	494	-62.479	1549.88	744	-57.553	1551.88	994	-59.003	1553.88
245	-56.864	1547.888	495	-62.933	1549.888	745	-57.556	1551.888	995	-58.996	1553.888
246	-56.861	1547.896	496	-63.379	1549.896	746	-57.561	1551.896	996	-59.005	1553.896
247	-56.865	1547.904	497	-63.72	1549.904	747	-57.56	1551.904	997	-59.024	1553.904
248	-56.869	1547.912	498	-64.052	1549.912	748	-57.561	1551.912	998	-59.037	1553.912
249	-56.88	1547.92	499	-64.246	1549.92	749	-57.561	1551.92	999	-59.035	1553.92
250	-56.888	1547.928	500	-64.311	1549.928	750	-57.572	1551.928	1000	-59.034	1553.928
									1001	-59.044	1553.936

TYPE	TRACE
DATE & TIME	11Apr2015 10:11PM EDT
INSTRUMENT	86142B
AIR/VACUUM/STP	VACUUM
TRACE	A
START	1545.976
STOP	1553.976
HORIZONTAL SCALE	nm
LENGTH (pts)	1001
RBW (nm)	0.1
VBW (Hz)	194
REFERENCE LEVEL (dBm)	-58
VERTICAL SCALE	dBm
SENSITIVITY (dBm)	-82.34
AVERAGING	OFF
MIN	OFF
MAX	OFF
SMOOTHING	OFF
TRACE MATH	OFF
OFFSET (dB)	0
MARKER	1
MARKER TRACE	A
MARKER X POSITION	1549.976
MARKER AMPLITUDE	-65.042
MARKER UNITS	dBm

A

SN DE44103305 REV B.06.02

Temp 50

0.008

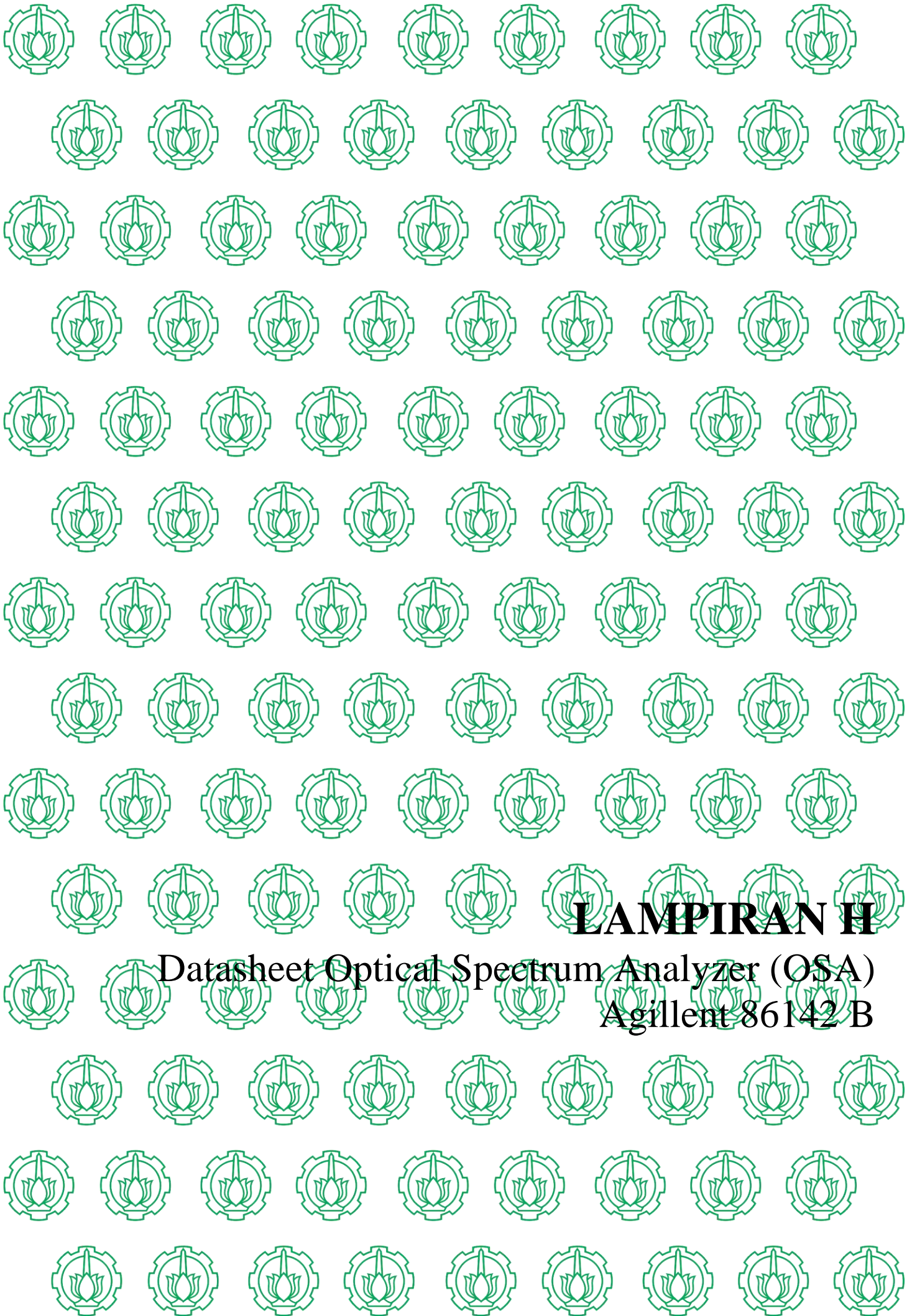
INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$	INDEX	Intensitas	$\lambda$
1	-56.324	1545.976	251	-56.557	1547.976	501	-65.042	1549.976	751	-58.967	1551.976
2	-56.311	1545.984	252	-56.562	1547.984	502	-64.985	1549.984	752	-58.973	1551.984
3	-56.302	1545.992	253	-56.556	1547.992	503	-64.866	1549.992	753	-58.989	1551.992
4	-56.299	1546	254	-56.557	1548	504	-64.648	1550	754	-58.998	1552
5	-56.288	1546.008	255	-56.555	1548.008	505	-64.372	1550.008	755	-58.997	1552.008
6	-56.282	1546.016	256	-56.557	1548.016	506	-64.025	1550.016	756	-59	1552.016
7	-56.277	1546.024	257	-56.549	1548.024	507	-63.632	1550.024	757	-59.012	1552.024
8	-56.267	1546.032	258	-56.552	1548.032	508	-63.255	1550.032	758	-59.024	1552.032
9	-56.269	1546.04	259	-56.55	1548.04	509	-62.749	1550.04	759	-59.037	1552.04
10	-56.265	1546.048	260	-56.54	1548.048	510	-62.303	1550.048	760	-59.048	1552.048
11	-56.263	1546.056	261	-56.54	1548.056	511	-61.843	1550.056	761	-59.049	1552.056
12	-56.269	1546.064	262	-56.533	1548.064	512	-61.379	1550.064	762	-59.052	1552.064
13	-56.269	1546.072	263	-56.529	1548.072	513	-60.87	1550.072	763	-59.06	1552.072
14	-56.265	1546.08	264	-56.534	1548.08	514	-60.541	1550.08	764	-59.065	1552.08
15	-56.259	1546.088	265	-56.533	1548.088	515	-60.096	1550.088	765	-59.082	1552.088
16	-56.262	1546.096	266	-56.533	1548.096	516	-59.739	1550.096	766	-59.094	1552.096
17	-56.263	1546.104	267	-56.531	1548.104	517	-59.358	1550.104	767	-59.099	1552.104
18	-56.255	1546.112	268	-56.53	1548.112	518	-59.032	1550.112	768	-59.103	1552.112
19	-56.245	1546.12	269	-56.527	1548.12	519	-58.747	1550.12	769	-59.116	1552.12
20	-56.254	1546.128	270	-56.529	1548.128	520	-58.49	1550.128	770	-59.125	1552.128
21	-56.252	1546.136	271	-56.52	1548.136	521	-58.288	1550.136	771	-59.134	1552.136
22	-56.246	1546.144	272	-56.514	1548.144	522	-58.115	1550.144	772	-59.146	1552.144
23	-56.237	1546.152	273	-56.515	1548.152	523	-57.963	1550.152	773	-59.157	1552.152
24	-56.231	1546.16	274	-56.521	1548.16	524	-57.861	1550.16	774	-59.161	1552.16
25	-56.22	1546.168	275	-56.525	1548.168	525	-57.782	1550.168	775	-59.177	1552.168
26	-56.214	1546.176	276	-56.521	1548.176	526	-57.73	1550.176	776	-59.188	1552.176
27	-56.208	1546.184	277	-56.516	1548.184	527	-57.697	1550.184	777	-59.191	1552.184
28	-56.202	1546.192	278	-56.522	1548.192	528	-57.654	1550.192	778	-59.201	1552.192
29	-56.192	1546.2	279	-56.524	1548.2	529	-57.64	1550.2	779	-59.219	1552.2
30	-56.179	1546.208	280	-56.53	1548.208	530	-57.635	1550.208	780	-59.23	1552.208
31	-56.17	1546.216	281	-56.543	1548.216	531	-57.631	1550.216	781	-59.242	1552.216
32	-56.173	1546.224	282	-56.538	1548.224	532	-57.638	1550.224	782	-59.245	1552.224
33	-56.167	1546.232	283	-56.539	1548.232	533	-57.646	1550.232	783	-59.255	1552.232
34	-56.152	1546.24	284	-56.539	1548.24	534	-57.647	1550.24	784	-59.265	1552.24
35	-56.145	1546.248	285	-56.546	1548.248	535	-57.648	1550.248	785	-59.274	1552.248
36	-56.13	1546.256	286	-56.545	1548.256	536	-57.653	1550.256	786	-59.285	1552.256
37	-56.129	1546.264	287	-56.553	1548.264	537	-57.662	1550.264	787	-59.288	1552.264
38	-56.122	1546.272	288	-56.557	1548.272	538	-57.662	1550.272	788	-59.29	1552.272
39	-56.114	1546.28	289	-56.549	1548.28	539	-57.667	1550.28	789	-59.311	1552.28
40	-56.111	1546.288	290	-56.553	1548.288	540	-57.671	1550.288	790	-59.327	1552.288
41	-56.103	1546.296	291	-56.552	1548.296	541	-57.679	1550.296	791	-59.338	1552.296



42	-56.091	1546.304	292	-56.552	1548.304	542	-57.686	1550.304	792	-59.346	1552.304
43	-56.086	1546.312	293	-56.553	1548.312	543	-57.698	1550.312	793	-59.357	1552.312
44	-56.084	1546.32	294	-56.549	1548.32	544	-57.701	1550.32	794	-59.365	1552.32
45	-56.083	1546.328	295	-56.544	1548.328	545	-57.71	1550.328	795	-59.382	1552.328
46	-56.077	1546.336	296	-56.546	1548.336	546	-57.713	1550.336	796	-59.385	1552.336
47	-56.075	1546.344	297	-56.548	1548.344	547	-57.706	1550.344	797	-59.393	1552.344
48	-56.071	1546.352	298	-56.553	1548.352	548	-57.717	1550.352	798	-59.401	1552.352
49	-56.077	1546.36	299	-56.542	1548.36	549	-57.725	1550.36	799	-59.411	1552.36
50	-56.077	1546.368	300	-56.54	1548.368	550	-57.728	1550.368	800	-59.423	1552.368
51	-56.074	1546.376	301	-56.537	1548.376	551	-57.732	1550.376	801	-59.435	1552.376
52	-56.072	1546.384	302	-56.536	1548.384	552	-57.744	1550.384	802	-59.454	1552.384
53	-56.078	1546.392	303	-56.536	1548.392	553	-57.752	1550.392	803	-59.46	1552.392
54	-56.079	1546.4	304	-56.529	1548.4	554	-57.757	1550.4	804	-59.464	1552.4
55	-56.083	1546.408	305	-56.533	1548.408	555	-57.766	1550.408	805	-59.48	1552.408
56	-56.087	1546.416	306	-56.531	1548.416	556	-57.767	1550.416	806	-59.488	1552.416
57	-56.084	1546.424	307	-56.541	1548.424	557	-57.767	1550.424	807	-59.494	1552.424
58	-56.084	1546.432	308	-56.547	1548.432	558	-57.774	1550.432	808	-59.503	1552.432
59	-56.088	1546.44	309	-56.55	1548.44	559	-57.78	1550.44	809	-59.517	1552.44
60	-56.083	1546.448	310	-56.562	1548.448	560	-57.784	1550.448	810	-59.536	1552.448
61	-56.076	1546.456	311	-56.561	1548.456	561	-57.783	1550.456	811	-59.544	1552.456
62	-56.07	1546.464	312	-56.56	1548.464	562	-57.789	1550.464	812	-59.553	1552.464
63	-56.06	1546.472	313	-56.567	1548.472	563	-57.802	1550.472	813	-59.562	1552.472
64	-56.057	1546.48	314	-56.564	1548.48	564	-57.798	1550.48	814	-59.575	1552.48
65	-56.06	1546.488	315	-56.569	1548.488	565	-57.796	1550.488	815	-59.581	1552.488
66	-56.051	1546.496	316	-56.573	1548.496	566	-57.804	1550.496	816	-59.595	1552.496
67	-56.054	1546.504	317	-56.579	1548.504	567	-57.806	1550.504	817	-59.61	1552.504
68	-56.056	1546.512	318	-56.582	1548.512	568	-57.806	1550.512	818	-59.616	1552.512
69	-56.058	1546.52	319	-56.582	1548.52	569	-57.814	1550.52	819	-59.621	1552.52
70	-56.055	1546.528	320	-56.583	1548.528	570	-57.822	1550.528	820	-59.624	1552.528
71	-56.053	1546.536	321	-56.584	1548.536	571	-57.824	1550.536	821	-59.637	1552.536
72	-56.059	1546.544	322	-56.585	1548.544	572	-57.827	1550.544	822	-59.653	1552.544
73	-56.065	1546.552	323	-56.58	1548.552	573	-57.828	1550.552	823	-59.661	1552.552
74	-56.074	1546.56	324	-56.571	1548.56	574	-57.834	1550.56	824	-59.668	1552.56
75	-56.084	1546.568	325	-56.57	1548.568	575	-57.833	1550.568	825	-59.677	1552.568
76	-56.086	1546.576	326	-56.564	1548.576	576	-57.831	1550.576	826	-59.686	1552.576
77	-56.098	1546.584	327	-56.569	1548.584	577	-57.838	1550.584	827	-59.699	1552.584
78	-56.111	1546.592	328	-56.566	1548.592	578	-57.841	1550.592	828	-59.716	1552.592
79	-56.121	1546.6	329	-56.565	1548.6	579	-57.848	1550.6	829	-59.712	1552.6
80	-56.14	1546.608	330	-56.559	1548.608	580	-57.85	1550.608	830	-59.719	1552.608
81	-56.152	1546.616	331	-56.558	1548.616	581	-57.848	1550.616	831	-59.723	1552.616
82	-56.16	1546.624	332	-56.557	1548.624	582	-57.845	1550.624	832	-59.732	1552.624
83	-56.175	1546.632	333	-56.548	1548.632	583	-57.845	1550.632	833	-59.743	1552.632
84	-56.186	1546.64	334	-56.55	1548.64	584	-57.847	1550.64	834	-59.742	1552.64
85	-56.19	1546.648	335	-56.548	1548.648	585	-57.851	1550.648	835	-59.746	1552.648
86	-56.189	1546.656	336	-56.546	1548.656	586	-57.85	1550.656	836	-59.759	1552.656
87	-56.19	1546.664	337	-56.54	1548.664	587	-57.85	1550.664	837	-59.76	1552.664
88	-56.189	1546.672	338	-56.542	1548.672	588	-57.849	1550.672	838	-59.762	1552.672
89	-56.192	1546.68	339	-56.543	1548.68	589	-57.854	1550.68	839	-59.766	1552.68
90	-56.192	1546.688	340	-56.538	1548.688	590	-57.859	1550.688	840	-59.775	1552.688
91	-56.188	1546.696	341	-56.54	1548.696	591	-57.856	1550.696	841	-59.775	1552.696
92	-56.191	1546.704	342	-56.539	1548.704	592	-57.86	1550.704	842	-59.773	1552.704
93	-56.193	1546.712	343	-56.534	1548.712	593	-57.863	1550.712	843	-59.774	1552.712
94	-56.193	1546.72	344	-56.535	1548.72	594	-57.862	1550.72	844	-59.776	1552.72
95	-56.186	1546.728	345	-56.534	1548.728	595	-57.866	1550.728	845	-59.781	1552.728
96	-56.189	1546.736	346	-56.54	1548.736	596	-57.872	1550.736	846	-59.787	1552.736
97	-56.184	1546.744	347	-56.539	1548.744	597	-57.873	1550.744	847	-59.795	1552.744
98	-56.181	1546.752	348	-56.536	1548.752	598	-57.869	1550.752	848	-59.797	1552.752
99	-56.182	1546.76	349	-56.538	1548.76	599	-57.872	1550.76	849	-59.792	1552.76
100	-56.189	1546.768	350	-56.536	1548.768	600	-57.874	1550.768	850	-59.789	1552.768
101	-56.188	1546.776	351	-56.54	1548.776	601	-57.875	1550.776	851	-59.787	1552.776
102	-56.191	1546.784	352	-56.547	1548.784	602	-57.873	1550.784	852	-59.791	1552.784
103	-56.182	1546.792	353	-56.553	1548.792	603	-57.871	1550.792	853	-59.797	1552.792
104	-56.191	1546.8	354	-56.551	1548.8	604	-57.877	1550.8	854	-59.799	1552.8
105	-56.192	1546.808	355	-56.548	1548.808	605	-57.88	1550.808	855	-59.794	1552.808
106	-56.194	1546.816	356	-56.556	1548.816	606	-57.881	1550.816	856	-59.787	1552.816
107	-56.204	1546.824	357	-56.561	1548.824	607	-57.876	1550.824	857	-59.793	1552.824
108	-56.212	1546.832	358	-56.571	1548.832	608	-57.885	1550.832	858	-59.804	1552.832
109	-56.213	1546.84	359	-56.579	1548.84	609	-57.885	1550.84	859	-59.814	1552.84
110	-56.219	1546.848	360	-56.582	1548.848	610	-57.879	1550.848	860	-59.814	1552.848
111	-56.228	1546.856	361	-56.591	1548.856	611	-57.878	1550.856	861	-59.821	1552.856
112	-56.237	1546.864	362	-56.604	1548.864	612	-57.884	1550.864	862	-59.826	1552.864
113	-56.242	1546.872	363	-56.618	1548.872	613	-57.887	1550.872	863	-59.829	1552.872
114	-56.248	1546.88	364	-56.614	1548.88	614	-57.888	1550.88	864	-59.826	1552.88

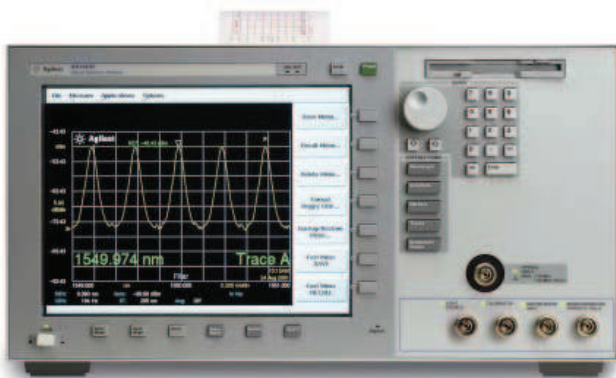
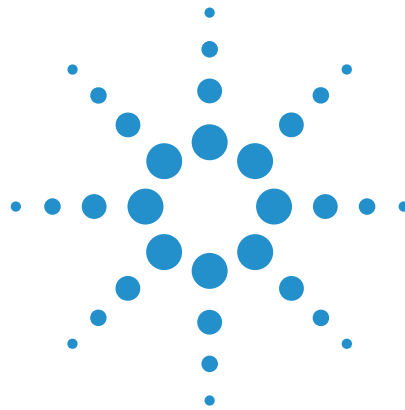
115	-56.257	1546.888	365	-56.617	1548.888	615	-57.889	1550.888	865	-59.826	1552.888
116	-56.261	1546.896	366	-56.626	1548.896	616	-57.896	1550.896	866	-59.834	1552.896
117	-56.275	1546.904	367	-56.635	1548.904	617	-57.897	1550.904	867	-59.833	1552.904
118	-56.284	1546.912	368	-56.642	1548.912	618	-57.891	1550.912	868	-59.84	1552.912
119	-56.289	1546.92	369	-56.646	1548.92	619	-57.899	1550.92	869	-59.839	1552.92
120	-56.287	1546.928	370	-56.648	1548.928	620	-57.902	1550.928	870	-59.829	1552.928
121	-56.291	1546.936	371	-56.673	1548.936	621	-57.907	1550.936	871	-59.834	1552.936
122	-56.294	1546.944	372	-56.679	1548.944	622	-57.911	1550.944	872	-59.838	1552.944
123	-56.296	1546.952	373	-56.684	1548.952	623	-57.913	1550.952	873	-59.834	1552.952
124	-56.299	1546.96	374	-56.693	1548.96	624	-57.912	1550.96	874	-59.853	1552.96
125	-56.304	1546.968	375	-56.702	1548.968	625	-57.915	1550.968	875	-59.846	1552.968
126	-56.319	1546.976	376	-56.709	1548.976	626	-57.922	1550.976	876	-59.842	1552.976
127	-56.327	1546.984	377	-56.715	1548.984	627	-57.927	1550.984	877	-59.841	1552.984
128	-56.326	1546.992	378	-56.72	1548.992	628	-57.936	1550.992	878	-59.849	1552.992
129	-56.33	1547	379	-56.725	1549	629	-57.935	1551	879	-59.86	1553
130	-56.346	1547.008	380	-56.733	1549.008	630	-57.938	1551.008	880	-59.859	1553.008
131	-56.359	1547.016	381	-56.738	1549.016	631	-57.946	1551.016	881	-59.874	1553.016
132	-56.374	1547.024	382	-56.748	1549.024	632	-57.947	1551.024	882	-59.882	1553.024
133	-56.383	1547.032	383	-56.758	1549.032	633	-57.954	1551.032	883	-59.89	1553.032
134	-56.398	1547.04	384	-56.765	1549.04	634	-57.966	1551.04	884	-59.902	1553.04
135	-56.408	1547.048	385	-56.773	1549.048	635	-57.969	1551.048	885	-59.906	1553.048
136	-56.418	1547.056	386	-56.777	1549.056	636	-57.975	1551.056	886	-59.912	1553.056
137	-56.431	1547.064	387	-56.789	1549.064	637	-57.984	1551.064	887	-59.913	1553.064
138	-56.439	1547.072	388	-56.797	1549.072	638	-57.99	1551.072	888	-59.928	1553.072
139	-56.448	1547.08	389	-56.81	1549.08	639	-57.997	1551.08	889	-59.928	1553.08
140	-56.446	1547.088	390	-56.817	1549.088	640	-58.001	1551.088	890	-59.928	1553.088
141	-56.454	1547.096	391	-56.824	1549.096	641	-58.001	1551.096	891	-59.953	1553.096
142	-56.459	1547.104	392	-56.836	1549.104	642	-58.006	1551.104	892	-59.973	1553.104
143	-56.458	1547.112	393	-56.844	1549.112	643	-58.015	1551.112	893	-59.981	1553.112
144	-56.464	1547.12	394	-56.859	1549.12	644	-58.032	1551.12	894	-59.984	1553.12
145	-56.472	1547.128	395	-56.863	1549.128	645	-58.047	1551.128	895	-59.985	1553.128
146	-56.473	1547.136	396	-56.868	1549.136	646	-58.052	1551.136	896	-60.003	1553.136
147	-56.476	1547.144	397	-56.882	1549.144	647	-58.057	1551.144	897	-60.014	1553.144
148	-56.478	1547.152	398	-56.891	1549.152	648	-58.066	1551.152	898	-60.036	1553.152
149	-56.479	1547.16	399	-56.902	1549.16	649	-58.074	1551.16	899	-60.049	1553.16
150	-56.484	1547.168	400	-56.911	1549.168	650	-58.084	1551.168	900	-60.067	1553.168
151	-56.492	1547.176	401	-56.92	1549.176	651	-58.09	1551.176	901	-60.086	1553.176
152	-56.493	1547.184	402	-56.928	1549.184	652	-58.096	1551.184	902	-60.104	1553.184
153	-56.497	1547.192	403	-56.937	1549.192	653	-58.101	1551.192	903	-60.116	1553.192
154	-56.507	1547.2	404	-56.945	1549.2	654	-58.109	1551.2	904	-60.122	1553.2
155	-56.505	1547.208	405	-56.957	1549.208	655	-58.127	1551.208	905	-60.136	1553.208
156	-56.513	1547.216	406	-56.966	1549.216	656	-58.14	1551.216	906	-60.158	1553.216
157	-56.521	1547.224	407	-56.97	1549.224	657	-58.154	1551.224	907	-60.16	1553.224
158	-56.52	1547.232	408	-56.971	1549.232	658	-58.173	1551.232	908	-60.176	1553.232
159	-56.526	1547.24	409	-56.976	1549.24	659	-58.185	1551.24	909	-60.195	1553.24
160	-56.538	1547.248	410	-56.982	1549.248	660	-58.19	1551.248	910	-60.212	1553.248
161	-56.548	1547.256	411	-56.987	1549.256	661	-58.196	1551.256	911	-60.243	1553.256
162	-56.562	1547.264	412	-56.998	1549.264	662	-58.216	1551.264	912	-60.254	1553.264
163	-56.56	1547.272	413	-57.006	1549.272	663	-58.24	1551.272	913	-60.267	1553.272
164	-56.561	1547.28	414	-57.012	1549.28	664	-58.255	1551.28	914	-60.271	1553.28
165	-56.567	1547.288	415	-57.02	1549.288	665	-58.269	1551.288	915	-60.292	1553.288
166	-56.574	1547.296	416	-57.026	1549.296	666	-58.274	1551.296	916	-60.323	1553.296
167	-56.573	1547.304	417	-57.031	1549.304	667	-58.289	1551.304	917	-60.34	1553.304
168	-56.573	1547.312	418	-57.038	1549.312	668	-58.301	1551.312	918	-60.352	1553.312
169	-56.583	1547.32	419	-57.044	1549.32	669	-58.319	1551.32	919	-60.369	1553.32
170	-56.59	1547.328	420	-57.047	1549.328	670	-58.329	1551.328	920	-60.377	1553.328
171	-56.601	1547.336	421	-57.045	1549.336	671	-58.345	1551.336	921	-60.399	1553.336
172	-56.604	1547.344	422	-57.049	1549.344	672	-58.362	1551.344	922	-60.418	1553.344
173	-56.604	1547.352	423	-57.062	1549.352	673	-58.368	1551.352	923	-60.44	1553.352
174	-56.605	1547.36	424	-57.076	1549.36	674	-58.388	1551.36	924	-60.452	1553.36
175	-56.608	1547.368	425	-57.082	1549.368	675	-58.402	1551.368	925	-60.471	1553.368
176	-56.609	1547.376	426	-57.088	1549.376	676	-58.419	1551.376	926	-60.49	1553.376
177	-56.618	1547.384	427	-57.094	1549.384	677	-58.438	1551.384	927	-60.505	1553.384
178	-56.611	1547.392	428	-57.091	1549.392	678	-58.448	1551.392	928	-60.521	1553.392
179	-56.608	1547.4	429	-57.099	1549.4	679	-58.455	1551.4	929	-60.534	1553.4
180	-56.613	1547.408	430	-57.105	1549.408	680	-58.462	1551.408	930	-60.536	1553.408
181	-56.616	1547.416	431	-57.111	1549.416	681	-58.471	1551.416	931	-60.556	1553.416
182	-56.611	1547.424	432	-57.111	1549.424	682	-58.487	1551.424	932	-60.563	1553.424
183	-56.607	1547.432	433	-57.117	1549.432	683	-58.505	1551.432	933	-60.578	1553.432
184	-56.606	1547.44	434	-57.124	1549.44	684	-58.51	1551.44	934	-60.598	1553.44
185	-56.608	1547.448	435	-57.13	1549.448	685	-58.515	1551.448	935	-60.612	1553.448
186	-56.612	1547.456	436	-57.138	1549.456	686	-58.524	1551.456	936	-60.63	1553.456
187	-56.612	1547.464	437	-57.144	1549.464	687	-58.542	1551.464	937	-60.639	1553.464

188	-56.609	1547.472	438	-57.156	1549.472	688	-58.551	1551.472	938	-60.664	1553.472
189	-56.614	1547.48	439	-57.161	1549.48	689	-58.562	1551.48	939	-60.684	1553.48
190	-56.614	1547.488	440	-57.17	1549.488	690	-58.571	1551.488	940	-60.709	1553.488
191	-56.615	1547.496	441	-57.176	1549.496	691	-58.584	1551.496	941	-60.71	1553.496
192	-56.609	1547.504	442	-57.182	1549.504	692	-58.598	1551.504	942	-60.729	1553.504
193	-56.602	1547.512	443	-57.181	1549.512	693	-58.611	1551.512	943	-60.746	1553.512
194	-56.607	1547.52	444	-57.186	1549.52	694	-58.622	1551.52	944	-60.757	1553.52
195	-56.609	1547.528	445	-57.194	1549.528	695	-58.629	1551.528	945	-60.776	1553.528
196	-56.606	1547.536	446	-57.203	1549.536	696	-58.631	1551.536	946	-60.797	1553.536
197	-56.606	1547.544	447	-57.204	1549.544	697	-58.635	1551.544	947	-60.813	1553.544
198	-56.608	1547.552	448	-57.218	1549.552	698	-58.647	1551.552	948	-60.839	1553.552
199	-56.604	1547.56	449	-57.222	1549.56	699	-58.654	1551.56	949	-60.856	1553.56
200	-56.602	1547.568	450	-57.222	1549.568	700	-58.67	1551.568	950	-60.867	1553.568
201	-56.591	1547.576	451	-57.227	1549.576	701	-58.683	1551.576	951	-60.887	1553.576
202	-56.59	1547.584	452	-57.235	1549.584	702	-58.693	1551.584	952	-60.913	1553.584
203	-56.591	1547.592	453	-57.245	1549.592	703	-58.699	1551.592	953	-60.922	1553.592
204	-56.594	1547.6	454	-57.252	1549.6	704	-58.697	1551.6	954	-60.934	1553.6
205	-56.599	1547.608	455	-57.256	1549.608	705	-58.704	1551.608	955	-60.951	1553.608
206	-56.599	1547.616	456	-57.267	1549.616	706	-58.716	1551.616	956	-60.968	1553.616
207	-56.598	1547.624	457	-57.274	1549.624	707	-58.725	1551.624	957	-60.988	1553.624
208	-56.601	1547.632	458	-57.285	1549.632	708	-58.73	1551.632	958	-60.993	1553.632
209	-56.603	1547.64	459	-57.29	1549.64	709	-58.732	1551.64	959	-61.006	1553.64
210	-56.606	1547.648	460	-57.295	1549.648	710	-58.747	1551.648	960	-61.026	1553.648
211	-56.605	1547.656	461	-57.304	1549.656	711	-58.751	1551.656	961	-61.027	1553.656
212	-56.614	1547.664	462	-57.316	1549.664	712	-58.754	1551.664	962	-61.035	1553.664
213	-56.612	1547.672	463	-57.324	1549.672	713	-58.763	1551.672	963	-61.044	1553.672
214	-56.61	1547.68	464	-57.329	1549.68	714	-58.768	1551.68	964	-61.064	1553.68
215	-56.609	1547.688	465	-57.34	1549.688	715	-58.775	1551.688	965	-61.075	1553.688
216	-56.611	1547.696	466	-57.362	1549.696	716	-58.778	1551.696	966	-61.096	1553.696
217	-56.606	1547.704	467	-57.371	1549.704	717	-58.78	1551.704	967	-61.11	1553.704
218	-56.603	1547.712	468	-57.37	1549.712	718	-58.788	1551.712	968	-61.123	1553.712
219	-56.603	1547.72	469	-57.379	1549.72	719	-58.791	1551.72	969	-61.132	1553.72
220	-56.6	1547.728	470	-57.386	1549.728	720	-58.792	1551.728	970	-61.132	1553.728
221	-56.598	1547.736	471	-57.393	1549.736	721	-58.806	1551.736	971	-61.133	1553.736
222	-56.599	1547.744	472	-57.407	1549.744	722	-58.805	1551.744	972	-61.149	1553.744
223	-56.598	1547.752	473	-57.412	1549.752	723	-58.806	1551.752	973	-61.155	1553.752
224	-56.594	1547.76	474	-57.428	1549.76	724	-58.812	1551.76	974	-61.157	1553.76
225	-56.594	1547.768	475	-57.445	1549.768	725	-58.816	1551.768	975	-61.159	1553.768
226	-56.587	1547.776	476	-57.462	1549.776	726	-58.83	1551.776	976	-61.169	1553.776
227	-56.591	1547.784	477	-57.503	1549.784	727	-58.844	1551.784	977	-61.172	1553.784
228	-56.591	1547.792	478	-57.547	1549.792	728	-58.843	1551.792	978	-61.176	1553.792
229	-56.594	1547.8	479	-57.588	1549.8	729	-58.838	1551.8	979	-61.183	1553.8
230	-56.595	1547.808	480	-57.673	1549.808	730	-58.844	1551.808	980	-61.191	1553.808
231	-56.59	1547.816	481	-57.777	1549.816	731	-58.853	1551.816	981	-61.196	1553.816
232	-56.586	1547.824	482	-57.925	1549.824	732	-58.857	1551.824	982	-61.198	1553.824
233	-56.579	1547.832	483	-58.114	1549.832	733	-58.861	1551.832	983	-61.204	1553.832
234	-56.571	1547.84	484	-58.336	1549.84	734	-58.865	1551.84	984	-61.209	1553.84
235	-56.565	1547.848	485	-58.605	1549.848	735	-58.87	1551.848	985	-61.198	1553.848
236	-56.559	1547.856	486	-58.896	1549.856	736	-58.881	1551.856	986	-61.206	1553.856
237	-56.547	1547.864	487	-59.227	1549.864	737	-58.878	1551.864	987	-61.219	1553.864
238	-56.539	1547.872	488	-59.724	1549.872	738	-58.891	1551.872	988	-61.224	1553.872
239	-56.538	1547.88	489	-60.196	1549.88	739	-58.899	1551.88	989	-61.245	1553.88
240	-56.534	1547.888	490	-60.707	1549.888	740	-58.905	1551.888	990	-61.24	1553.888
241	-56.53	1547.896	491	-61.267	1549.896	741	-58.907	1551.896	991	-61.241	1553.896
242	-56.528	1547.904	492	-61.783	1549.904	742	-58.915	1551.904	992	-61.239	1553.904
243	-56.531	1547.912	493	-62.461	1549.912	743	-58.921	1551.912	993	-61.23	1553.912
244	-56.532	1547.92	494	-62.956	1549.92	744	-58.931	1551.92	994	-61.248	1553.92
245	-56.538	1547.928	495	-63.432	1549.928	745	-58.928	1551.928	995	-61.261	1553.928
246	-56.539	1547.936	496	-63.901	1549.936	746	-58.934	1551.936	996	-61.266	1553.936
247	-56.541	1547.944	497	-64.303	1549.944	747	-58.938	1551.944	997	-61.282	1553.944
248	-56.544	1547.952	498	-64.613	1549.952	748	-58.941	1551.952	998	-61.279	1553.952
249	-56.545	1547.96	499	-64.849	1549.96	749	-58.949	1551.96	999	-61.274	1553.96
250	-56.549	1547.968	500	-64.988	1549.968	750	-58.957	1551.968	1000	-61.26	1553.968
									1001	-61.266	1553.976



# Agilent 86142B and 86146B Optical Spectrum Analyzers

## Technical Overview



### Full-Feature Optical Spectrum Analyzer

Exhibits excellent speed and dynamic range with convenient and powerful user interface.

### Filter Mode

Wavelength - filtered signal can be coupled to a single-mode fiber output for tunable-filter and channel-drop applications.

### Dispersion Penalty Calculation

Dispersion penalty calculation software combines 86146B and 86100C to measure time-resolved chirp and calculate dispersion penalty.



**Agilent Technologies**



# Specifications

## Characteristics and specifications

The distinction between specifications and characteristics is described as follows:

- Specifications describe warranted performance.
- Characteristics provide useful, but non-warranted information about the functions and performance of the instrument. Characteristics are indicated below as typical, Typ.

All specifications apply after the instrument's temperature has been stabilized after 1 hour continuous operation and the auto-align routine has been run. Unless otherwise noted, specifications apply without USER CAL.

The 86146B specifications are for the 50  $\mu\text{m}$  internal path only.

The specifications apply to all functions autocoupled over the temperature range 0 ° to 55 °C and relative humidity < 95 % (unless otherwise noted).

Table 1.

Wavelength		
	Agilent 86142B & 86146B	Notes
Range	600 nm to 1700 nm	
Reproducibility	$\pm 0.002$ nm	With applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$ ; $\leq 1$ min
Span range	0.2 nm to full range and zero span	
Accuracy after calibration with internal source and with enhanced wavelength calibration for specified range.		At room temp; with applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$
1480-1570 nm	Typ. $\pm 0.01$ nm	
1570-1620 nm	Typ. $\pm 0.025$ nm	
After calibration with external reference source(s)		At room temp, with applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$
$\pm 10$ nm of calibration reference point(s)	Typ. $\pm 0.01$ nm	
After user calibration over full wavelength range (600-1700 nm)	$\pm 0.2$ nm	T(20 - 30 °C); with applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$
Absolute accuracy	$\pm 0.5$ nm	Factory cal. 2 yr. cycle; T(20 - 30°C); with applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$
Tuning repeatability	$\pm 0.002$ nm	With applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$ ; $\leq 1$ min
Span linearity		T(20 - 30 °C); with applied input fiber 9/125 $\mu\text{m}$
1525-1570 nm	Typ. $\pm 0.01$ nm,	
for spans < 40 nm	Typ. $\pm 0.02$ nm	

1. T(#) indicates temperature range and dependence

Table 2.

Resolution bandwidth (RBW)				
	Agilent 86142B	Agilent 86146B	Agilent 86142B w/Opt E02	Notes
FWHM (3 dB bandwidth)	0.06, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 nm	0.06, 0.07, 0.1, 0.14, 0.2, 0.33, 0.5, 1, 2, 5, 10 nm	0.07, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 nm	Resolution of 10 nm is available for first order grating response only; with applied input fiber 9/125 $\mu$ m
Noise marker bandwidth accuracy using noise markers 1525-1610 nm				
$\geq 0.5$ nm		$\pm 2\%$	$\pm 3\%$	T(20 - 30 °C)
0.2 nm		$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	
0.1 nm		$\pm 7\%$	$\pm 10\%$	
0.06 nm		$\pm 12\%$	—	

1. T(#) indicates temperature range and dependence

Table 3.

Amplitude			
		Agilent 86142B & 86146B	Notes
<b>Sensitivity</b>			Sensitivity is defined as signal value > 6 x RMS noise value
600-750 nm, 750-900 nm	- 60 dBm, - 75 dBm		T(0 - 30 °C), 2nd order
900-1250 nm, 1250-1610 nm	- 75 dBm, - 90 dBm		T(0 - 30 °C)
1610-1700 nm	- 80 dBm		T(20 - 30 °C)
<b>Maximum measurement power</b>			Resolution bandwidth setting < channel spacing
1525-1700 nm 600-1000 nm 1000-1525 nm	Typ. + 15 dBm per channel, + 30 dBm total Typ. + 15 dBm per channel, + 30 dBm total Typ. + 12 dBm per channel, + 30 dBm total		
<b>Maximum safe power</b>			
Total safe power	+ 30 dBm		
Total power within any 10 nm portion of the spectrum	+ 23 dBm		
<b>Absolute accuracy</b>			For resolution ≥ 0.1 nm, with applied input fiber 9/125 μm
at –20 dBm, 1310 nm/1550 nm	± 0.5 dB		
Scale fidelity			
Autorange off Autorange on	± 0.05 dB ± 0.07 dB		Excluding amplitude errors at low power levels due to noise, T(20 - 30 °C), with applied input fiber 9/125 μm
Display scale (log scale)	0.01-20 dB/DIV, -120 to +90 dBm		
<b>Amplitude stability (1310 nm, 1550 nm)</b>			
1 minute	± 0.01 dB		For signals within 8 dB of top of screen, with applied input fiber 9/125 μm
15 minute	Typ. ± 0.02 dB		with applied input fiber 9/125 μm
Flatness	Agilent 86142B, 86146B	Agilent 86142B w/Opt E02	With applied input fiber 9/125 μm
1290-1330 nm 1525-1570 nm 1525-1610 nm	± 0.2 dB —— ± 0.2 dB	—— ± 0.2 dB ——	
1250-1610 nm	± 0.7 dB	——	Absorption of light by atmospheric moisture affects flatness at 1350-1420 nm
<b>Polarization dependence</b>			For resolution ≥ 0.2 nm, at room temp, with applied input fiber 9/125 μm
1310 nm 1530 nm, 1565 nm 1600 nm 1250-1650 nm	± 0.12 dB ± 0.05 dB ± 0.08 dB ± 0.25 dB	± 0.5 dB	

1. T(#) indicates temperature range and dependence

Table 4.

Dynamic range				
	Agilent 86142B, 86146B		Agilent 86142B with Opt E02	Notes
In 0.1 nm resolution bandwidth				Excluding multiple order grating response, with applied input fiber 9/125 μm
1250-1610 nm (chop mode on) ± 0.5 nm, ± 1nm, ± 5 nm	Typ. - 70 dB			Chop mode not available on the 86146B model
<b>1550 nm</b>				
at ± 0.8 nm (± 100 GHz at 1550 nm)	- 60 dB	- 60 dB	Average of all states of polarization	
at ± 0.5 nm (± 62.5 GHz at 1550 nm)	- 58 dB	Typ - 55 dB		
at ± 0.4 nm (± 50 GHz at 1550 nm)	- 55 dB	Typ - 52 dB		
at ± 0.2 nm (± 25 GHz at 1550 nm)	Typ. - 40 dB	—		
Monochromator input				
	Agilent 86142B & 86146B			Notes
Input return loss Straight connector (9/125 μm)	> 35 dB			Depends on the quality of the attached connector, with applied 9/125 μm straight connector
Sweep				
	Agilent 86142B & 86146B			Notes
Max. sweep rate	Typ. 40 nm/56.3 ms			
Max. sampling rate in zero span	Typ. 50 μs/trace point			
<b>Sweep cycle time</b>				
50 nm span, auto zero off	Typ < 180 ms			
50 nm span, auto zero on	Typ < 340 ms			
100 nm span	Typ < 400 ms			
500 nm span	Typ < 650 ms			
<b>ADC trigger accuracy</b>				
Jitter (distributed uniformly)	Typ. < ± 0.5 μs			
Trigger delay range	Typ. 2 μs - 6.5 ms			
Pulse mode accuracy				
	Agilent 86142B, 86146B		Agilent 86142B with Opt E02	Notes
Turn On (≥ 2 μs after rising edge)	Typ. < ± 0.2 dB		Typ. < ± 0.2 dB	(Starting from dark)
Turn Off (≥ 10 μs after falling edge)	< ± 0.2 dB (30 dB extinction)		Typ. < ± 0.2 dB	
Computer interfacing				
	Agilent 86142B & 86146B			Notes
Remote control	Web enabled controls			
Compatibility	IEEE-488.1, IEEE-488-2 (100 %)			
Interfaces	LAN, GPIB, parallel printer port, external VGA monitor, keyboard and mouse (PS/2)			
Floppy disk	3.5" 1.44 MB, MS-DOS			MS-DOS is a U.S. registered trademark of microsoft corporation
Data export	Spreadsheet and word processor compatible (CSV ASCII)			
Graphics export	CGM, PCL, GIF			
Instrument drivers	Universal instrument drivers (PNP), compatible with agilent VEE, labview, visual basic and C++			Labview is a U.S. registered trademark of national instruments



Table 5.

General specifications	
Agilent 86142B & 86146B	
Dimensions	222 mm high x 425 mm wide x 427 mm long
Weight	16.5 Kg
<b>Environmental</b>	
Temperature*	Operating 0 °C to 55 °C, storage – 40 °C to 70 °C
Humidity	Operating < 95 % RH, Storage: Noncondensing
Altitude	Up to 200 meters (6.600 feet)
EMI	Conducted and radiated interference is in compliance with CISPR pub 11, IEC 801-3, IEC 801-4 and IEC 555-2
<b>Power requirements</b>	
Voltage and frequency	90 Vac to 260 Vac, 44 to 444 Hz
Maximum power consumption	230 W

1. \* Floppy disk and printer operating temperature range 0 °C to 45 °C

## Additional Specifications: Agilent 86146B (for 9 µm filter mode output only)

Table 6.

Insertion loss stability			
1550 nm, 15 minutes	0.5 dB	Immediately following enhanced single point auto align, at constant temperature	
Insertion loss			
1550 nm	Typ. 10 dB max	At room temperature	
Filter bandwidth: (from 1530 nm to 1610 nm)			
	0.5 dB	1.0 dB	3.0 dB
RBW nominal setting	Actual bandwidth (Typ.)		
0.04 nm	0.016	0.023	0.039
0.05 nm	0.019	0.026	0.045
0.07 nm	0.033	0.044	0.063
0.1 nm	0.076	0.089	0.115
0.2 nm	0.134	0.147	0.173
0.3 nm	0.257	0.270	0.297
0.5 nm	0.421	0.434	0.460
	± 20 %		

Table 7.

Filter bandwidth: adjacent channel rejection (at 1550 nm)* (Typ.)				
RBN setting	12.5 GHz $\pm$ 0.1 nm	25 GHz $\pm$ 0.2 nm	50 GHz $\pm$ 0.4 nm	100 GHz $\pm$ 0.8 nm
0.04 nm	40 dB	50 dB	55 dB	55 dB
0.05 nm	40 dB	50 dB	55 dB	55 dB
0.07 nm	N/A	50 dB	55 dB	55 dB
0.1 nm	N/A	40 dB	50 dB	55 dB
0.2 nm	N/A	40 dB	45 dB	55 dB
0.3 nm	N/A	N/A	45 dB	55 dB
0.5 nm	N/A	N/A	45 dB	50 dB
Filter bandwidth: polarization dependence				
1550 nm	Typ $\pm$ 0.2 dB	for 0.2 nm filter bandwidth and greater, at room temperature		

1. \* Adjacent channel rejection limited to 60 dB below total integrated power

## Options and accessories

Table 8.

Agilent 86142B & 86146B	
Options (available on new instruments only)	
Multimode fiber interface (50 $\mu$ m)	86142B-E02
Current source	8614xB-001
White light source *	8614xB-002
Built-in 1310 & 1550 nm EELED source *	8614xB-004
Wavelength calibrator	8614xB-006
DWDM spectral analysis application	Included
Passive component test application	Included
Amplifier test application	Included
Source test application	Included
Time resolved Chirp with dispersion penalty calculation application software (also available separately)	86146B-DPC
Connector interface	FC/PC: 81000FI SC/PC: 81000KI DIN: 81000SI ST: 81000VI
Certificate of calibration	Included

1. \* 8614xB-002 and 004 are mutually exclusive



Table 9.

OSA fiber sizes						
Model number	Optical input	8614xB-002* (White light source)	8614xB-004* (1310/1550 EELED)	8614xB-006 (Calibrator)	Photodiode input	Mono output 1
86142B-E02	50 $\mu$ m	62.5 $\mu$ m	9 $\mu$ m	9 $\mu$ m	N/A	
86142B	9 $\mu$ m					
86146B					50 $\mu$ m	9 $\mu$ m

1. \* 8614xB-002 and 004 are exclusive

## Options and accessories: Specifications

Table 10.

Agilent 86142B & 86146B	
<b>8614xB-001 current source</b>	
Range	0 to $\pm 200$ mA (source or sink)
Resolution	Typ 50 $\mu$ A steps
Accuracy	2 % $\pm 50$ $\mu$ A
Clamp voltage (nominal)	$\pm 2.7$ V
Noise density at 1 kHz	Typ < 4 nA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Stability within 30 minutes	Typ. < 100 ppm $\pm 500$ nA
Temperature drift	Typ. < (100 ppm $\pm 500$ nA)/K
Pulse mode	
Pulse range	10 $\mu$ s to 6.5 ms
Pulse resolution	100 ns
Duty cycle range	Pulse width/1 s to 100 %
<b>8614xB-002 white light source</b>	
Wavelength*	900 nm to 1700 nm
Minimum output power spectral density** (9/125 $\mu$ m fiber)	
900 to 1600 nm	- 67 dBm/nm (0.2 nW/nm)
900 to 1600 nm	Typ. - 64 dBm/nm (0.4 nW/nm)
1600 to 1700 nm	- 70 dBm/nm (0.1 nW/nm)
Minimum output power spectral density***	
50/125 $\mu$ m fiber	Typ. - 50 dBm/nm (10 nW/nm)
62.5/125 $\mu$ m fiber	Typ. - 46 dBm/nm (25 nW/nm)
Output stability**	Typ. $\pm 0.02$ dB over 10 minutes
Lamp lifetime, mean time between failures (MTBF)	Typ > 5000 hours
<b>8614xB-004 EELED Sources</b>	
Minimum spectral power density	
1300 to 1320 nm, 1540 to 1560 nm	> - 40 dBm/nm (100nW/nm)
1250 to 1620 nm	Typ. > - 60 dBm/nm (1nW/nm)
Return loss with straight connector	Typ. > 25 dB
Stability (ambient temp. < $\pm 1$ °C)	
Over 15 minutes	Typ. < $\pm 0.02$ dB
Over 6 hours	Typ. < $\pm 0.05$ dB

1. \* filtered below 850 nm.

2. \*\* with applied input fiber 9/125  $\mu$ m

3. \*\*\* Typ; includes power in full numerical aperture of fiber

## 8614xB-006 wavelength calibrator

The wavelength calibrator option provides an onboard wavelength reference that can be used to automatically calibrate the optical spectrum analyzer. The calibrator is based on an EELED and an Acetylene gas absorption cell, Figure 1. The acetylene absorbs light at very specific wavelengths based on the molecular properties of gas. The cell is illuminated by an EELED and the OSA uses the absorption pits to perform a wavelength calibration, Figure 2. Since the absorption of the acetylene gas is a physical constant it never needs calibrating.

The wavelength calibrator enhances the OSA to achieve better than  $\pm 10$  pm wavelength accuracy and removes the need to use a tunable laser source and multi-wavelength meter as an external reference.

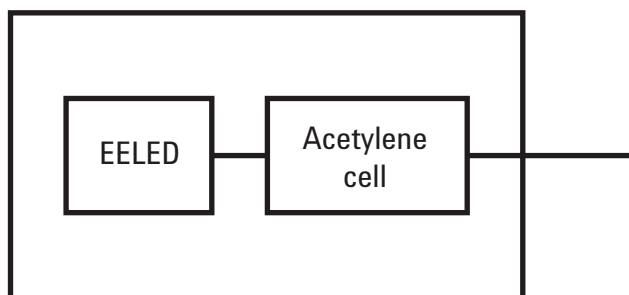


Figure 1. Wavelength calibrator block diagram

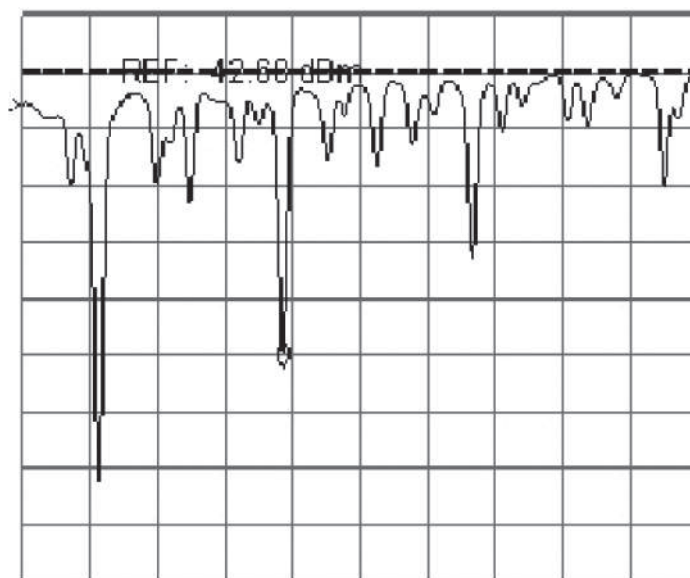


Figure 2. Wavelength calibrator absorption spectrum

Table 11.

Agilent 86142B & 86146B	
Additional parts and accessories	
Printer paper (5 rolls/box)	9270-1370
Additional connector interfaces	See Agilent 81000 Series
9 $\mu$ m single mode connector saver	Standard
Rack-mount flange kit (with handles)	8614xB-A X 4 (8614xB-AXE)
Transit case	9211-2657
Soft carrying case	N/A

# Definition of Terms

## Wavelength

- Absolute accuracy (after user cal) refers to the wavelength accuracy after the user has performed the internal wavelength calibration using a source of known wavelength.
- Reproducibility refers to the amount of wavelength drift, which can occur over the specified time while the OSA is swept across a source of known wavelength.
- Tuning repeatability refers to the wavelength accuracy of returning to a wavelength after having tuned to a different wavelength.

## Resolution

- FWHM refers to the full-width-half-maximum resolutions that are available. This indicates the width at half power level of the signal after passing through the resolution slits.

## Amplitude

- Scale fidelity refers to the potential errors in amplitude readout at amplitudes other than at the calibration point. This specification is sometimes called linearity.
- Flatness defines a floating band, which describes the error in signal amplitude over the indicated wavelength range. (This error may be removed at a given wavelength by performing the user amplitude calibration).
- Polarization dependence refers to the amplitude change that can be seen by varying the polarization of the light entering the OSA. This is not to be confused with amplitude variations caused by the varying distribution of energy between the different modes in fiber that are multimode at the wavelength of interest.

## Sensitivity

- Sensitivity is defined as the signal level that is equal to six times the RMS value of the noise. Displayed sensitivity values are nominal. Slightly lower values may have to be entered to achieve specified sensitivity.

## Dynamic Range

- Dynamic range is a measure of the ability to see low-level signals that are located very close (in wavelength) to a stronger signal. In electrical spectrum analyzers, this characteristic is generally called shape factor.

## Sweep Time

- Maximum sweep Rate refers to the maximum rate that the instrument is able to acquire data and display it. This rate may be limited by multiple internal processes when using default number of trace points.
- Sweep cycle time refers to the time required to make a complete sweep and prepare for the next sweep. It can be measured as the time from the start of one sweep to the start of the next sweep.



### Agilent Email Updates

[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)  
Get the latest information on the products and applications you select.

### Remove all doubt

Our repair and calibration services will get your equipment back to you, performing like new, when promised. You will get full value out of your Agilent equipment throughout its lifetime. Your equipment will be serviced by Agilent-trained technicians using the latest factory calibration procedures, automated repair diagnostics and genuine parts. You will always have the utmost confidence in your measurements. For information regarding self maintenance of this product, please contact your Agilent office.

Agilent offers a wide range of additional expert test and measurement services for your equipment, including initial start-up assistance, onsite education and training, as well as design, system integration, and project management.

For more information on repair and calibration services, go to:

[www.agilent.com/find/removealldoubt](http://www.agilent.com/find/removealldoubt)

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice.

Online assistance:  
[www.agilent.com/comms/lightwave](http://www.agilent.com/comms/lightwave)

[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
<http://www.agilent.com/comms/octspectral>

For more information on Agilent Technologies' products, applications or services, please contact your local Agilent office. The complete list is available at:

[www.agilent.com/find/contactus](http://www.agilent.com/find/contactus)

#### Americas

Canada	(877) 894-4414
Latin America	305 269 7500
United States	(800) 829-4444

#### Asia Pacific

Australia	1 800 629 485
China	800 810 0189
Hong Kong	800 938 693
India	1 800 112 929
Japan	0120 (421) 345
Korea	080 769 0800
Malaysia	1 800 888 848
Singapore	1 800 375 8100
Taiwan	0800 047 866
Thailand	1 800 226 008

#### Europe & Middle East

Austria	01 36027 71571
Belgium	32 (0) 2 404 93 40
Denmark	45 70 13 15 15
Finland	358 (0) 10 855 2100
France	0825 010 700*
	*0.125 €/minute
Germany	07031 464 6333
Ireland	1890 924 204
Israel	972-3-9288-504/544
Italy	39 02 92 60 8484
Netherlands	31 (0) 20 547 2111
Spain	34 (91) 631 3300
Sweden	0200-88 22 55
Switzerland	0800 80 53 53
United Kingdom	44 (0) 118 9276201

Other European Countries:

[www.agilent.com/find/contactus](http://www.agilent.com/find/contactus)

Revised: October 6, 2008

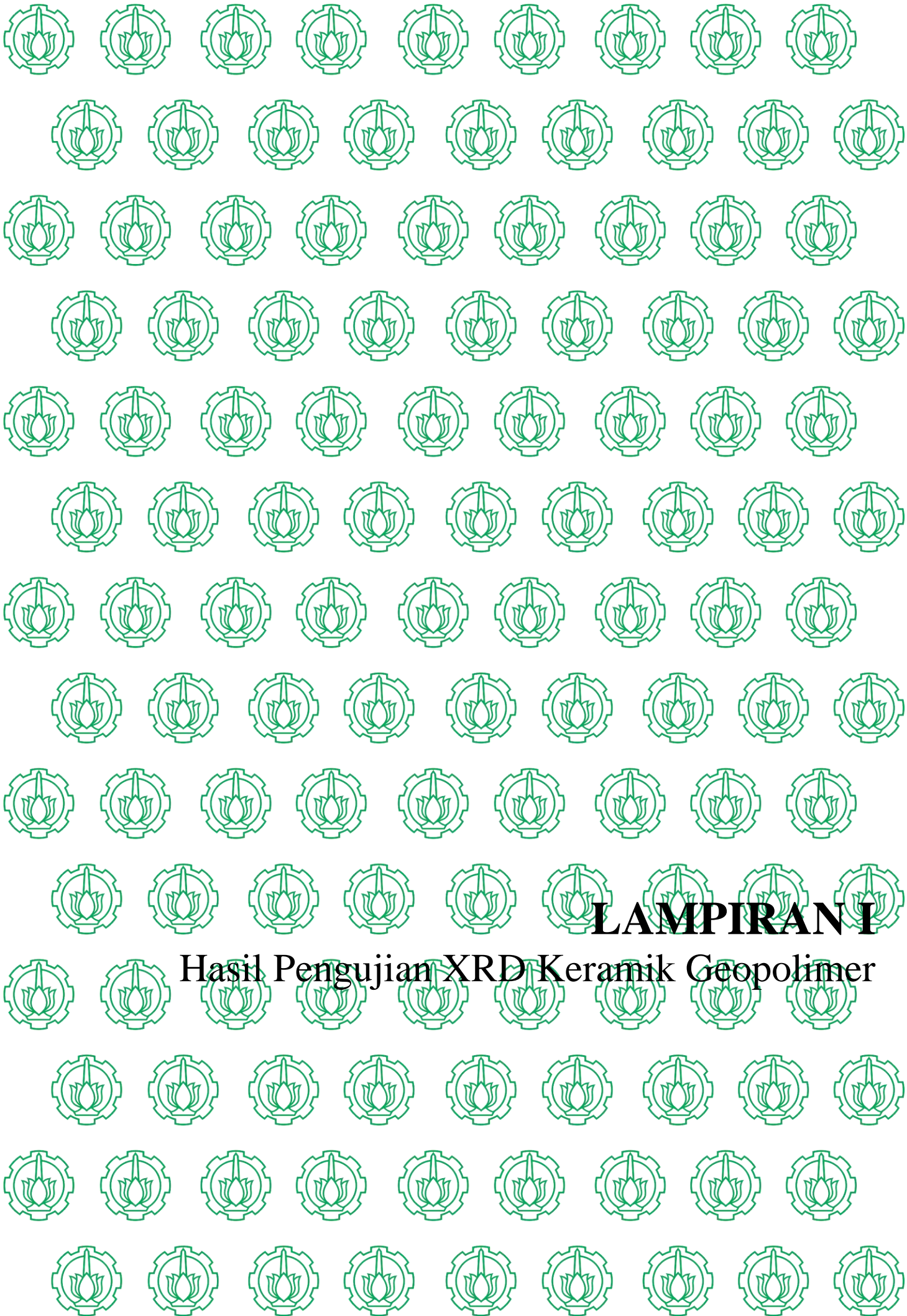
*Microsoft is a U.S. registered trademark of Microsoft Corporation.*

© Agilent Technologies, Inc. 2009  
Printed in USA, January 16, 2009  
5980-0177E



**Agilent Technologies**





# LAMPIRAN I

Hasil Pengujian XRD Keramik Geopolimer

# Match! Phase Analysis Report

Institute of Technology Sepuluh November (ITS), Department of Physics

Sample: KM 01

## Sample Data

File name	KM01.xy
File path	E:/S2/data mikrostruktur/Keramik Metakaolin
Data collected	Jun 18, 2015 05:24:01
Data range	10.080° - 70.050°
Number of points	3001
Step size	0.020
Rietveld refinement converged	No
Alpha2 subtracted	Yes
Background subtr.	No
Data smoothed	No
2theta correction	0.08°
Radiation	X-rays
Wavelength	1.540598 Å

## Matched Phases

Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	100.0		O2 Si
	22.0	Unidentified peak area	

### A: O2 Si (100.0 %)

Formula sum	O2 Si
Entry number	96-900-6304
Figure-of-Merit (FoM)	0.713597
Total number of peaks	276
Peaks in range	272
Peaks matched	6
Intensity scale factor	0.53
Space group	P 1
Crystal system	triclinic (anorthic)
Unit cell	a= 5.4515 Å b= 5.3227 Å c= 5.8091 Å α= 77.981° β= 82.235° γ= 54.577°
I/σcor	1.15
Calc. density	2.971 g/cm <sup>3</sup>
Reference	Boisen M. B., Gibbs G. V., Bukowski M. S. T., "Framework silica structures generated using simulated annealing with a potential energy function based on an H6Si2O7 molecule Sample: 20", Physics and Chemistry of Minerals <b>21</b> , 269-284 (1994)

## Candidates

Name	Formula	Entry No.	FoM
cesium magnesium leucite	Cs2 Mg O12 Si5	96-210-4395	0.7701
	Al Cs O4 Si	96-901-0467	0.7608
Dibarium ditiatium difluoride dioxide heptaoxidodisilicate	Ba2 F2 O9 Si2 Ti2	96-201-7043	0.7503
cesium copper leucite	Cs2 Cu O12 Si5	96-210-4677	0.7488
cesium zinc leucite	Cs2 O12 Si5 Zn	96-210-4397	0.7465
	Cs2 Ni O12 Si5	96-200-5339	0.7452
	Cs H O7 Si3	96-201-3632	0.7377
Gillespite	Ba Fe O10 Si4	96-900-0462	0.7310
Microcline	Al K O8 Si3	96-900-0702	0.7288
	Cd O12 Rb2 Si5	96-200-5336	0.7246
Analcime	Al1.806 H4 Na1.71 O14 Si4.194	96-900-4013	0.7238
	Cd Cs2 O12 Si5	96-210-1199	0.7224
Moganite	O2 Si	96-900-2649	0.7223
	K2 Mg O12 Si5	96-210-1101	0.7221
	Cs2 Mn O12 Si5	96-200-5337	0.7207
potassium aluminophosphate	Al3 K9 O24 P6	96-222-5830	0.7202
Analcime	Al1.806 H4 Na1.71 O14 Si4.194	96-900-4014	0.7183
	Rb4 S6 Si2	96-810-0237	0.7177
	Ba2 O7 Si2 Zn	96-810-0590	0.7176
	Al2 B2 O7 Rb2	96-220-1638	0.7174
	Al2 B2 O7 Rb2	96-900-7928	0.7174
Hexaiododisilane	I6 Si2	96-200-4954	0.7140
Dipotassium heptacaesium tecto-nonamolybdo(V)trialumoundecaphosphate(V)	Al3 Cs7 K2 Mo9 O59 P11	96-100-1864	0.7130
Analcime	Al1.806 H4 Na1.71 O14 Si4.194	96-900-4015	0.7129
Moganite	O2 Si	96-900-5116	0.7125
	Co Cs2 O12 Si5	96-200-5338	0.7119
Microcline	Al0.93 K O8 Si3.07	96-900-0190	0.7119
Anorthite	Al2 Ca O8 Si2	96-900-1259	0.7099
Wairakite	Al1.9 Ca0.899 H4 Na0.139 O14 Si4.1	96-900-0728	0.7099
Anorthite	Al2 Ca O8 Si2	96-900-1260	0.7099
Anorthite	Al2 Ca O8 Si2	96-900-0362	0.7096
Analcime	Al1.8 H4 Na1.8 O14 Si4	96-900-8388	0.7093
Wairakite	Al Ca0.5 H2 O7 Si2	96-901-1804	0.7088
Disamarium disilicate	O7 Si2 Sm2	96-100-8806	0.7083
Labradorite	Al0.824 Ca0.325 Na0.175 O4 Si1.174	96-900-0748	0.7075
Labradorite	Al0.824 Ca0.317 Na0.183 O4 Si1.174	96-900-0747	0.7073
Labradorite	Al0.83 Ca0.34 Na0.15 O4 Si1.17	96-900-0750	0.7071
Labradorite	Al0.81 Ca0.325 Na0.16 O4 Si1.19	96-900-0745	0.7069
Labradorite	Al0.81 Ca0.325 Na0.16 O4 Si1.19	96-900-0746	0.7069
Calcium tecto-dialumodisilicate (Anorthite)	Al2 Ca O8 Si2	96-100-0035	0.7056



Pellyte	Al0.2 Ba2 Ca Fe1.48 Mg0.22 Mn0.18 O17 / Si5.8 Zn0.1296-900-0483	0.7052
	Fe1.088 O8 Rb Si2.912	96-900-0289 0.7051
Nonacaesium tecto-trialumononamolybdo(V)undecaphosphate(V)	Al3 Cs9 Mb9 O59 P11	96-100-1642 0.7048
Albite	Al0.502 Na O4 Si1.497	96-900-0785 0.7041
Albite	Al0.502 Na O4 Si1.497	96-900-0787 0.7041
Anorthite	Al1.911 Ca0.716 Mn0.196 Na0.045 O8 Si2.089	96-900-5310 0.7038
	Br12 Si6	96-406-5685 0.7036
Anorthite	Al2 Ca O8 Si2	96-900-0363 0.7012
	La0.9 O7 Si2 Y1.1	96-150-8530 0.7003
barium oxo-aluminate hydride	Al Ba3 H O4	96-201-1884 0.6982
	Al2 Ca0.2 O8 Si2 Sr0.8	96-901-0287 0.6973
	La0.6 O7 Si2 Y1.4	96-150-8531 0.6972

and 10 others...

Search-Match

Settings	
Reference database used	Reference database created Apr 18, 2013 15:44:36
Automatic zeropoint adaptation	Yes
Minimum figure-of-merit (FoM)	0.60
Parameter/influence 2theta	0.50
Parameter/influence intensities	0.50
Parameter multiple/single phase(s)	0.50

Selection Criteria

Elements:

Elements of which at least one must be present:	Al, Si
Elements that may be present:	All elements not mentioned above

Peak List

No.	2theta [°]	d[Å]	I/I0	FWHM	Matched
1	21.07	4.2122	251.72	0.7996	A
2	26.85	3.3176	1900.80	0.6797	A

Rietveld Refinement using FullProf

Calculation was not run or did not converge.

Integrated Profile Areas

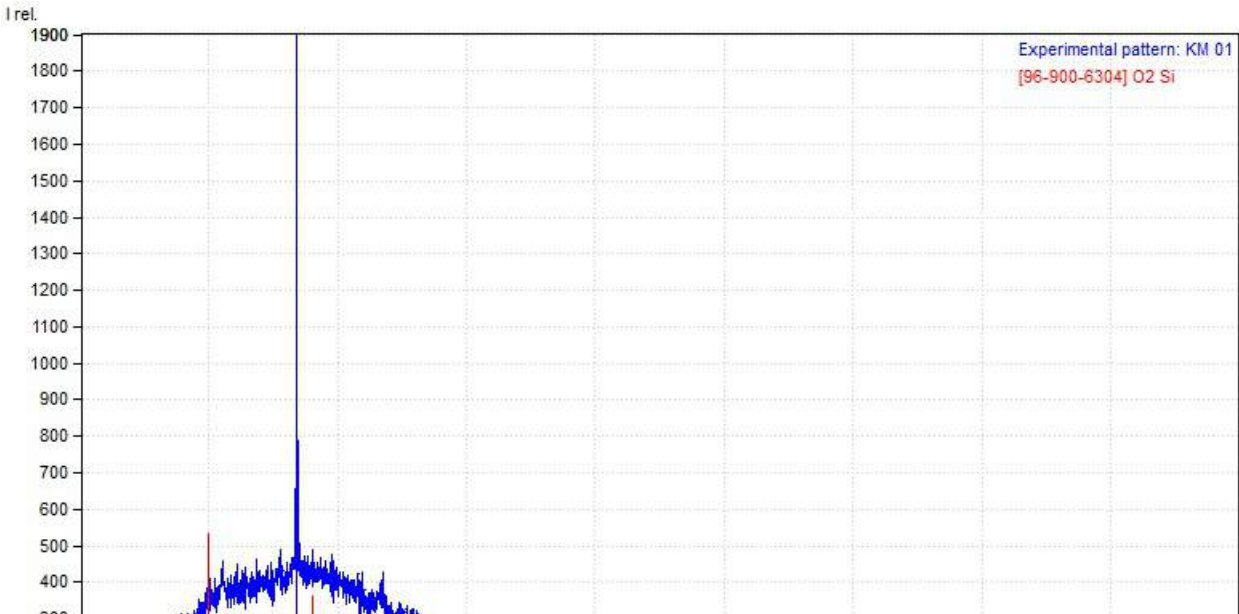
Based on calculated profile

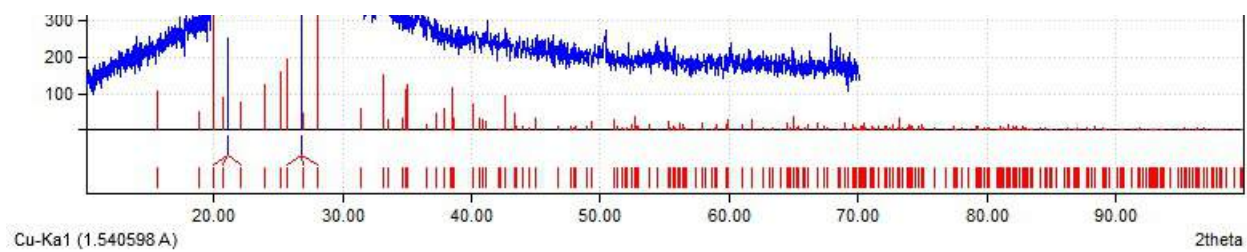
Profile area	Counts	Amount
Overall diffraction profile	3387586	100.00%
Background radiation	2479885	73.21%
Diffraction peaks	907700	26.79%
Peak area belonging to selected phases	163686	4.83%
Unidentified peak area	744015	21.96%

Peak Residuals

Peak data	Counts	Amount
Overall peak intensity	3153	100.00%
Peak intensity belonging to selected phases	891	28.26%
Unidentified peak intensity	2262	71.74%

Diffraction Pattern Graphics





Match! Copyright © 2003-2014 CRYSTAL IMPACT, Bonn, Germany

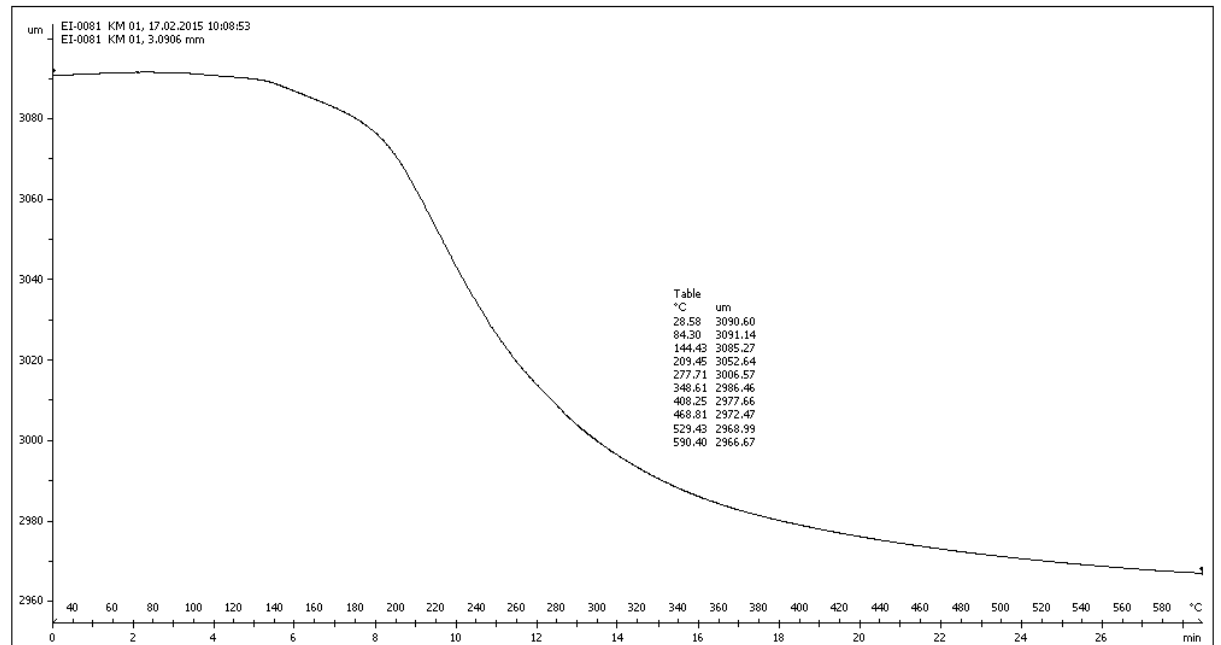


# LAMPIRAN J

Hasil Pengujian TMA Keramik Geopolimer

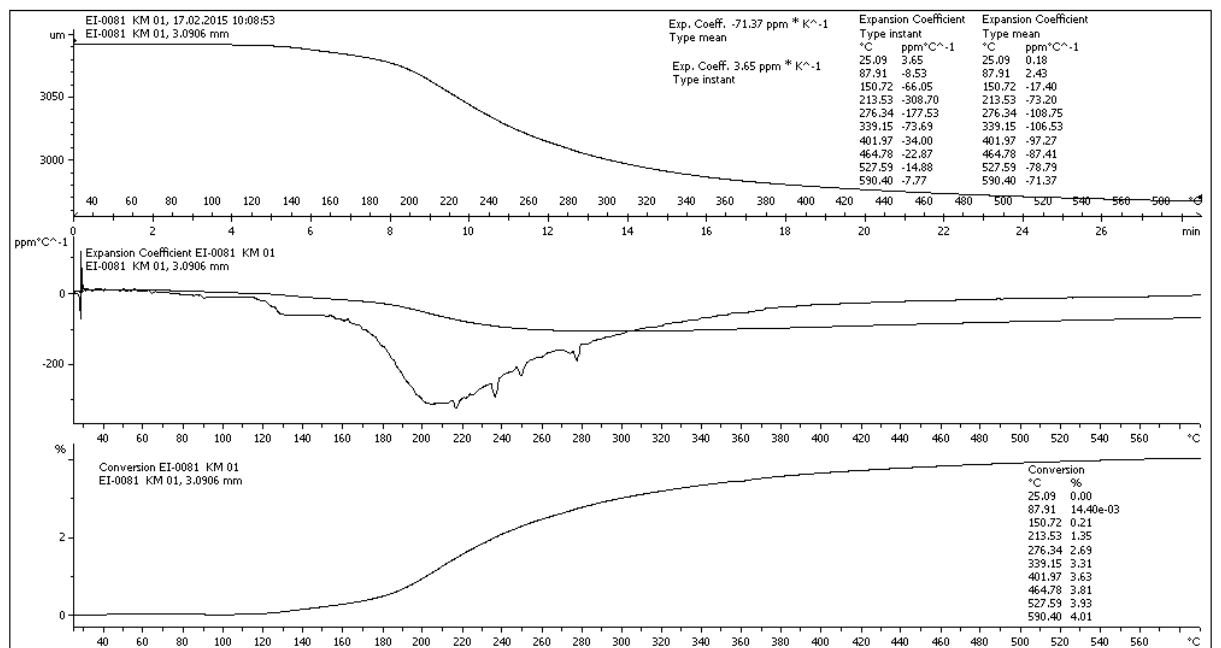
## LAMPIRAN J

### Hasil Pengujian TMA Keramik Geopolimer



ITS COE Laboratory: METTLER

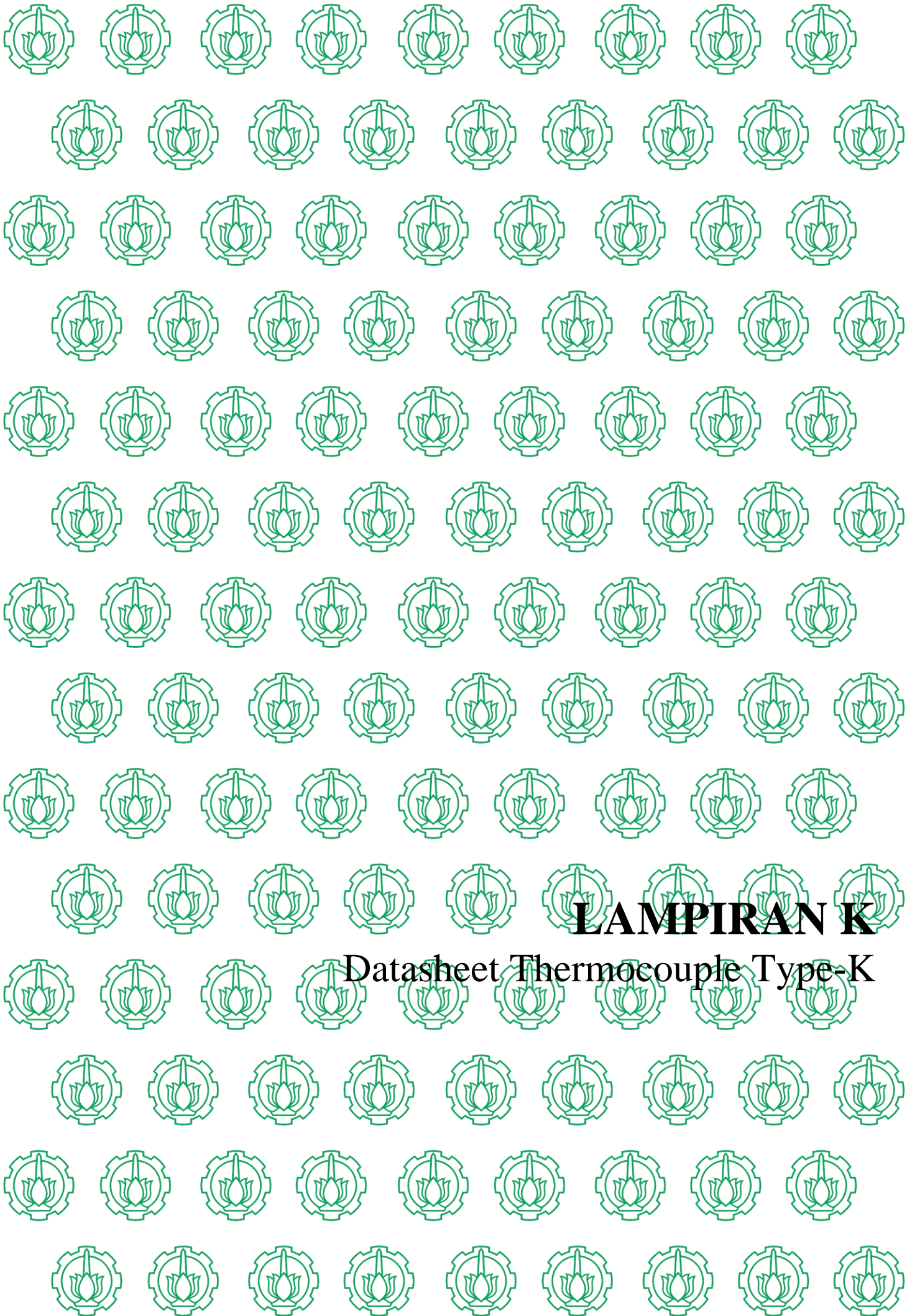
STAR® SW 10.00



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00





# LAMPIRAN K

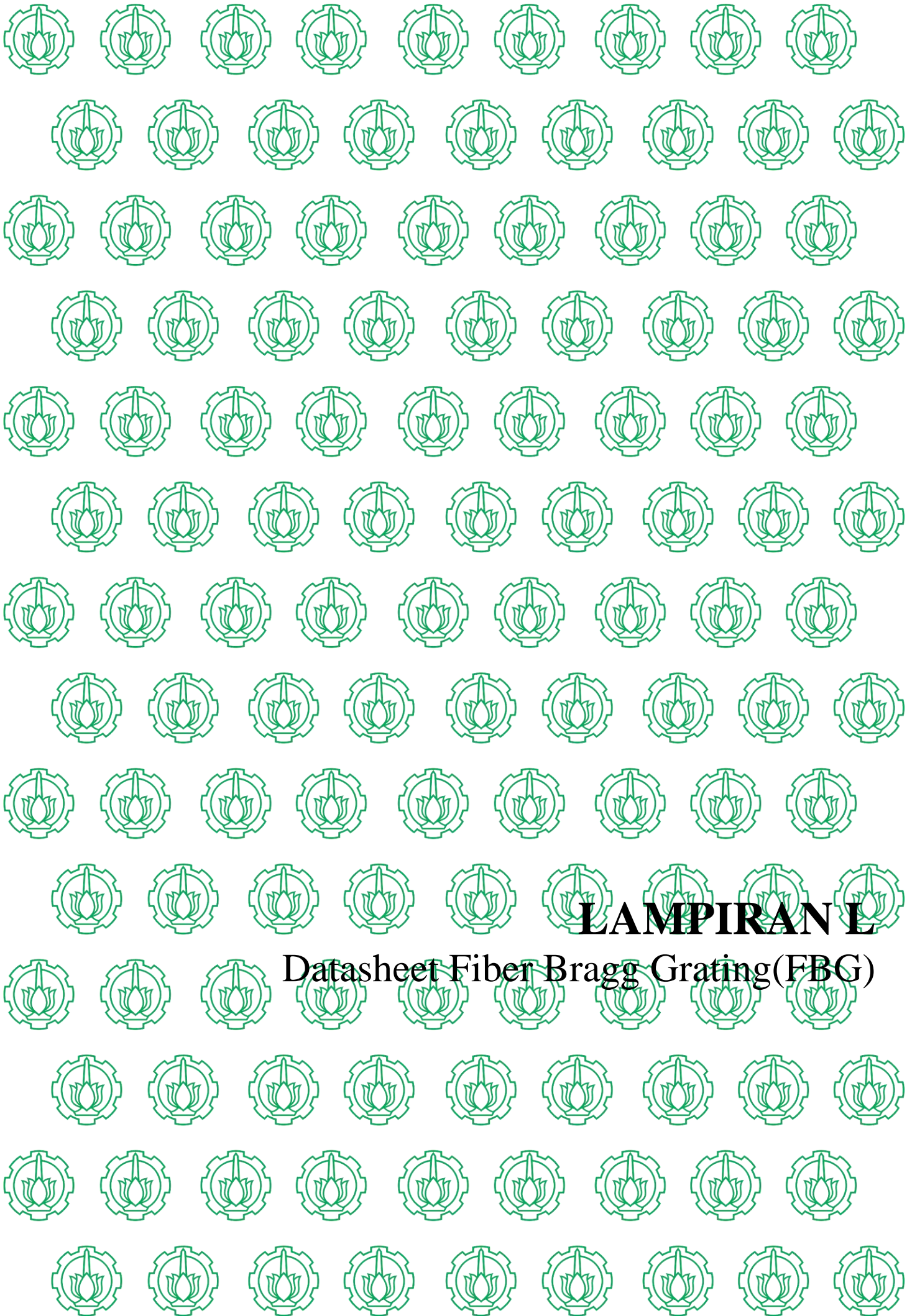
## Datasheet Thermocouple Type-K

## Thermocouple Baut Tipe K max 400 ° C



Range pengukuran	0 to 400°C
Panjang Kabel	1 m (3.28ft)
Lebar kawat	6.35mm (1 / 4")
Pelindung luar	stainless steel braiding
Jumlah probe	1
Dimensi ujung sensor	12.7mm (1 / 2")
Berat	20g / 0.7oz





# LAMPIRAN L

## Datasheet Fiber Bragg Grating(FBG)

# High Temperature Fiber Bragg Grating

## Applications

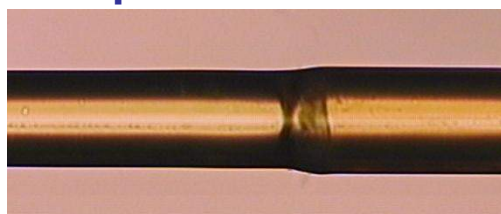
- Oil & Gas flowline monitoring
- Downhole monitoring
- Temperature / strain monitoring in power generators
- Transmission line health monitoring

## Key Features

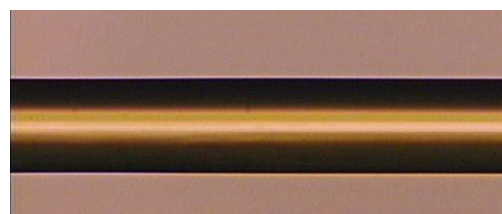
- High temperature resistance
- High tensile strength
- EMI immunity
- Explosion proof
- Small size & weight
- Good performance cost ratio

## Description

High Temperature Fiber Bragg Grating is imprinted on polyimide coated optical fiber, which is thermally stable to over 300°C and chemically inactive in the presence of composite resins. Based on Technicasa's special FBG manufacturing process, the FBG optical performance remain stable at high temperature enviroment which enable the precise strain and temperature measurement .



Stripping Junction recoating



Stripping area recoating

## Specifications

Parameter	Unit	Specifications	Tolerance	Remark
Max. Operation Temperature	°C	300	+/- 10	Higher operation temperature is available upon request
Operation Wavelength	nm	1460 – 1620	-	Other wavelength is also available upon request
Reflectivity	%	> 20	-	-
FWHM	nm	Typ. 0.3	+/- 0.2	-
Recoat	-	Polyimide Recoat	-	Excellent recoating Uniformity : +/- 5 um
Grating Length	mm	1 – 24		
Sidelobe Suppression Ratio	dB	>15	>15	-
Proof Test	kpsi	>100		-
Optical Connector	-	FC/APC, FC/UPC or other options		
Optical Fiber	-	OFS BF06158-02		

Ordering info: HTFBG-①①-②②②②-③③-④④④-⑤

①①:Reflectivity. ②②②②:Wavelength. ③③: Bandwidth.④④④: Temperature endurance  
 ⑤ :Connector type A:FC/APC, B:FC/UPC, C: Specify ,0:None

TOC LLC/ Technica S.A. undertakes a continuous and intensive product development to ensure its products perform to highest technical standards. As a result, the specifications in this document are subject to change without notice.

TOC LLC / Technica S.A. Headquarters  
 9210 Double Diamond Pkwy #T354,  
 Reno, NV, 89521-4842,  
 USA  
[www.technicasa.com](http://www.technicasa.com)

TOC LLC / Technica S.A.  
 China Beijing Operation  
 Tel: +86 10 62988792  
 Fax: +86 10 62985573  
 Email: [alice@technicasa.com](mailto:alice@technicasa.com)



## BIOGRAFI PENULIS



Haerul Ahmadi di Sungguminasa, 1 Mei 1988, adalah anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Manjalling Kab. Gowa Sulawesi Selatan, SLTPN 2 Bajeng Kab. Gowa Sulawesi Selatan, SMAN 1 Sungguminasa dan melanjutkan studi S1 Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Makassar pada tahun 2006. Bidang Minat yang ditekuni oleh penulis selama kuliah S1 adalah bidang Fisika Material.

Penulis melanjutkan studi di ITS melalui Program PraS2-S2 Saintek pada tahun 2012 di Jurusan Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember selama 2 semester dan selanjutnya mengambil S2 pada Jurusan Fisika dan bidang minat Fisika Instrumentasi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013. Selama kuliah, penulis sempat aktif mengikuti seminar dan pelatihan ilmiah. Apabila ingin berdiskusi lebih lanjut terkait topik tesis ini dapat menghubungi penulis melalui: [Haerulahmadi88@gmail.com](mailto:Haerulahmadi88@gmail.com).